



**KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH**

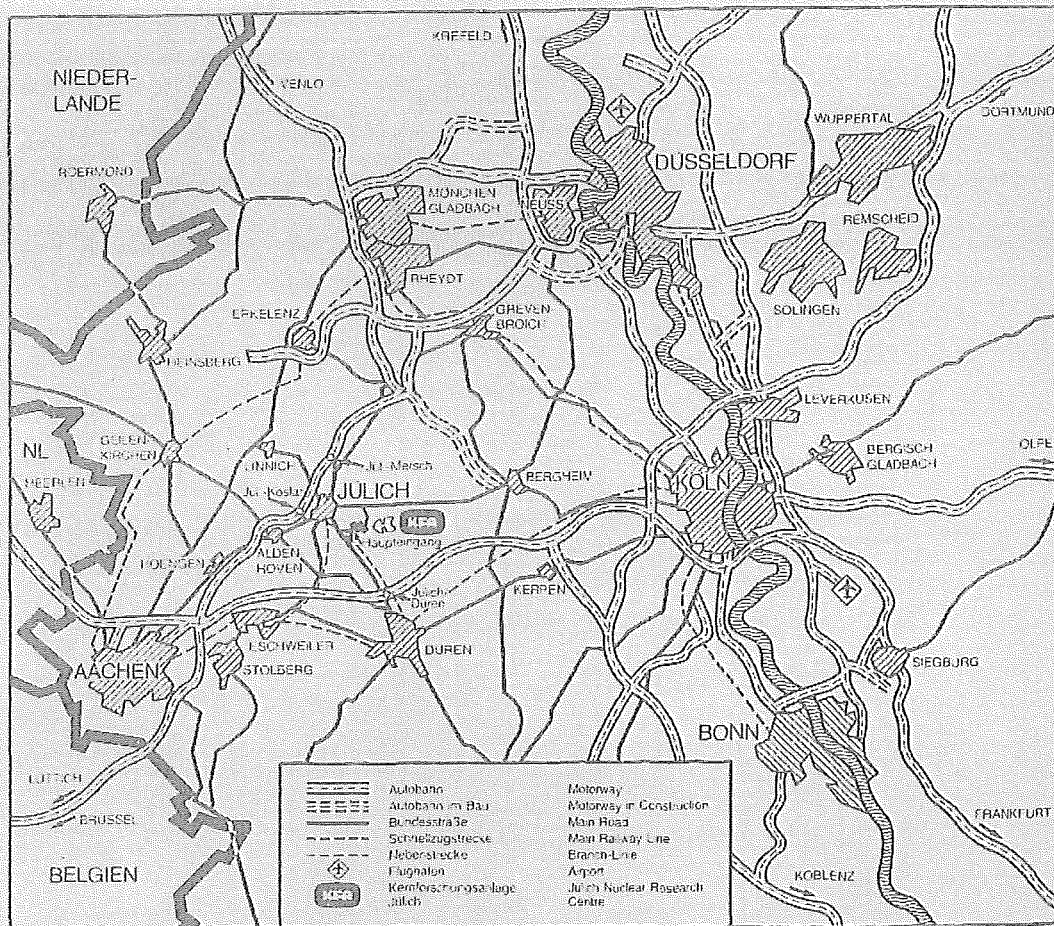
Zentralabteilung für Allgemeine Technologie

**Das Gleitreibungsverhalten verschiedener  
Werkstoffpaarungen bei Raumtemperatur  
in Helium-Atmosphäre und im Vakuum**

von

M. Fleischer

Jül-Spez-414  
September 1987  
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

**Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 414**  
 Zentralabteilung für Allgemeine Technologie Jül-Spez-414

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH  
 Postfach 19 13 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 0049 19 19 10 · Telex: 922555 D Jü d

**Das Gleitreibungsverhalten verschiedener  
Werkstoffpaarungen bei Raumtemperatur  
in Helium-Atmosphäre und im Vakuum**

von

M. Fleischer





## Zusammenfassung

Reibung ist eine Systemeigenschaft, die durch physikalische und chemische Eigenschaften der beteiligten Körper beeinflusst wird. Die Eigenschaften von Oberflächenschichten und deren Änderungen durch Reibung und Verschleiß spielen eine gewichtige Rolle für das Reibungsverhalten metallischer und keramischer Werkstoffe im Kontakt mit Metall, Keramik und Trockenschmierstoffschichten. Mit dem Ziel, Hilfen bei der Beurteilung und Auswahl von reibungsarmen bzw. von verschleißbeständigen Maschinenteilen zu geben, sind die tribologischen Grundlagen zusammengestellt und 19 Werkstoffpaarungen bei Raumtemperatur in Helium und teilweise im Vakuum auf eine Funktionsdauer von  $75 \times 10^3$  Wechselbelastungen getestet worden. Die Versuche haben gezeigt, daß unter den genannten Bedingungen und für die vorhandene Konstruktionsanordnung - "Keilmechanismus" - Werkstoffpaarungen gewählt werden können, mit denen die Funktionsfähigkeit über die geforderte Lebensdauer erreicht wird.



## Inhaltsübersicht

	<u>Seite</u>
1. Ziel der Untersuchungen	1
2. Verschleiß von Werkstoffen	3
2.1 Grundlagen des Verschleißes	3
2.1.1 Systemanalyse des Verschleißes	4
2.1.2 Die Verschleißmechanismen	9
3. Auswirkungen im Vakuum und in Helium-Atmosphäre	13
4. Versuchsaufbau	24
5. Durchführung der Versuche	29
6. Testergebnisse	40
7. Verwertbarkeit der Ergebnisse	97
8. Schrifttum	100



## 1. Ziel der Untersuchungen

Die fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der Helium- und Vakuumtechnologie verlangt mehr und mehr den Einbau von Elementen, die mechanische Gleit- und Drehbewegungen durchzuführen haben. Diese Elemente sind besonderen Bedingungen ausgesetzt und müssen oft über Jahre wartungslos einwandfrei arbeiten. Die Wechselwirkung zwischen den Kontaktflächen einander berührender Teile wird sowohl unter den Bedingungen des Hochtemperaturreaktors (HTR), das heißt bei Raumtemperatur oder zusätzlich erschwerend bei erhöhter Temperatur und in selektiv reduzierender bzw. oxydierender Atmosphäre als auch unter Hochvakuumbedingungen von entscheidender Bedeutung für die Lebensdauer. Reibung und Verschleiß werden bei Wärmebewegungen infolge von instationären Betriebsvorgängen oder beim Lösen im Preßsitz haftender Verbindungen verursacht. Sie werden durch Temperatur, Oberflächenzustand der berührenden Teile, Zusammensetzung der Umgebungsatmosphäre, Neigung der Partner zur Legierungsbildung und Flächenpressung entscheidend bestimmt.

Bei der geforderten hohen Zuverlässigkeit z.B. von Reaktor-komponenten ist es unbedingt erforderlich, die einzelnen Bauelemente für den jeweiligen Einsatzfall unter Originalbedingungen bzw. unter quasi ähnlichen erschwerten Bedingungen zu erproben. Die durchgeführten Versuche stellen einen Beitrag dazu dar.

Im Rahmen der Erprobung eines Schleusenschiebers für Brennelement-Eingabesysteme von HTR-Anlagen wurden Untersuchungen an Metalllegierungen, CVD-Hartstoffüberzügen (Karbide, Nitride) und Festschmierstoffen bei Raumtemperatur durchgeführt, die

- a) speziell zur Auffindung geeigneter Werkstoffkombinationen für die inneren und äußeren Keilpaare des besonders stark beanspruchten Spreizmechanismus dienen,



- b) einen allgemeinen Aufschluß über die Verwendbarkeit von Werkstoffpaarungen unter Helium- und Vakuumbedingungen geben sollen.

Die Versuche wurden in einer Heliumatmosphäre gefahren, die als spezifisch für den Hochtemperaturreaktor gelten kann. Einige gleichgepaarte Materialien, die im Vakuum bei einem Druck von ca.  $10^{-7}$  mbar untersucht wurden, können möglicherweise bei der Auswertung der Ergebnisse zusätzliche Erkenntnisse über den Einfluß des umgebenden Mediums geben.

Die Untersuchungen wurden unter den Aspekten von Reibung und Verschleiß sowie einer geforderten Lebensdauer von 75.000 Wechselbelastungen für den "Keil-in-Keil"-Mechanismus durchgeführt.

## 2. Verschleiß von Werkstoffen

### 2.1 Grundlagen des Verschleißes

In der Norm DIN 50320 von 1979 wird für den Verschleiß die folgende Definition gegeben:

"Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Körpers."

Es folgen drei Hinweise:

- a) Die Beanspruchung eines festen Körpers durch Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet.
- b) Verschleiß äußert sich im Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen (Verschleißpartikel) sowie in Stoff- und Formänderungen der tribologisch beanspruchten Oberflächenschicht.
- c) In der Technik ist Verschleiß normalerweise unerwünscht, d.h. wertmindernd. In Ausnahmefällen, wie z.B. bei Einlaufvorgängen, können Verschleißvorgänge jedoch auch technisch erwünscht sein. Bearbeitungsvorgänge als wertbildende technologische Vorgänge gelten in bezug auf das herzustellende Werkstück nicht als Verschleiß, obwohl im Grenzflächenbereich zwischen Werkzeug und Werkstück tribologische Prozesse wie beim Verschleiß ablaufen.

Mit anderen Worten unterscheidet sich der Verschleiß von der Bearbeitung dadurch, daß er zu einer Abnahme der Funktionsfähigkeit von Bauteilen führt.

### 2.1.1 Systemanalyse des Verschleißes

Bei der Anwendung der Systemanalyse zur Beschreibung von Verschleißvorgängen und zur Ordnung der relevanten Größen besteht der erste Schritt darin, die Bauteile einer Maschine, deren Verschleiß untersucht werden soll, räumlich von den anderen Bauteilen abzugrenzen. Dazu legt man eine Struktureinhüllende um die verschleißenden Bauteile und um die anderen am Verschleiß beteiligten Partner (Bild 1). Die Bauteile und die stofflichen Partner bezeichnet man als tribologische System (Abkürzung: Tribosystem). Im allgemeinen sind bei der Beschreibung von Verschleißvorgängen vier stoffliche Elemente zu berücksichtigen:

- I. Grundkörper
- II. Gegenkörper
- III. Zwischenstoff
- VI. Umgebungsmedium

Die Elemente machen zusammen mit ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen, zu denen wesentlich die Verschleißmechanismen gehören, die Struktur des Tribosystems aus. Wegen ihrer großen Bedeutung werden die Verschleißmechanismen im Abschnitt 2.1.2 näher beschrieben. Wie groß der Verschleiß wird, hängt maßgebend von den Eigenschaften der tribologisch beanspruchten Bauteile und der anderen am Verschleiß beteiligten Elemente ab. Sie sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Bei Grund- und Gegenkörper kann man zwischen Volumen- und Oberflächeneigenschaften sowie zwischen Stoff- und Formeigenschaften unterscheiden. Die Stoffeigenschaften der Oberflächenbereiche von Werkstoffen können erheblich von denen des Volumens abweichen, wie es in Bild 2 am Beispiel eines metallischen Werkstoffes dargestellt ist. Danach liegt unmittelbar an der Oberfläche eine physikalisch adsorbierte Schicht, es folgen eine chemisch adsorbierte Schicht, eine Störzone und der uneinflusste Grundwerkstoff.

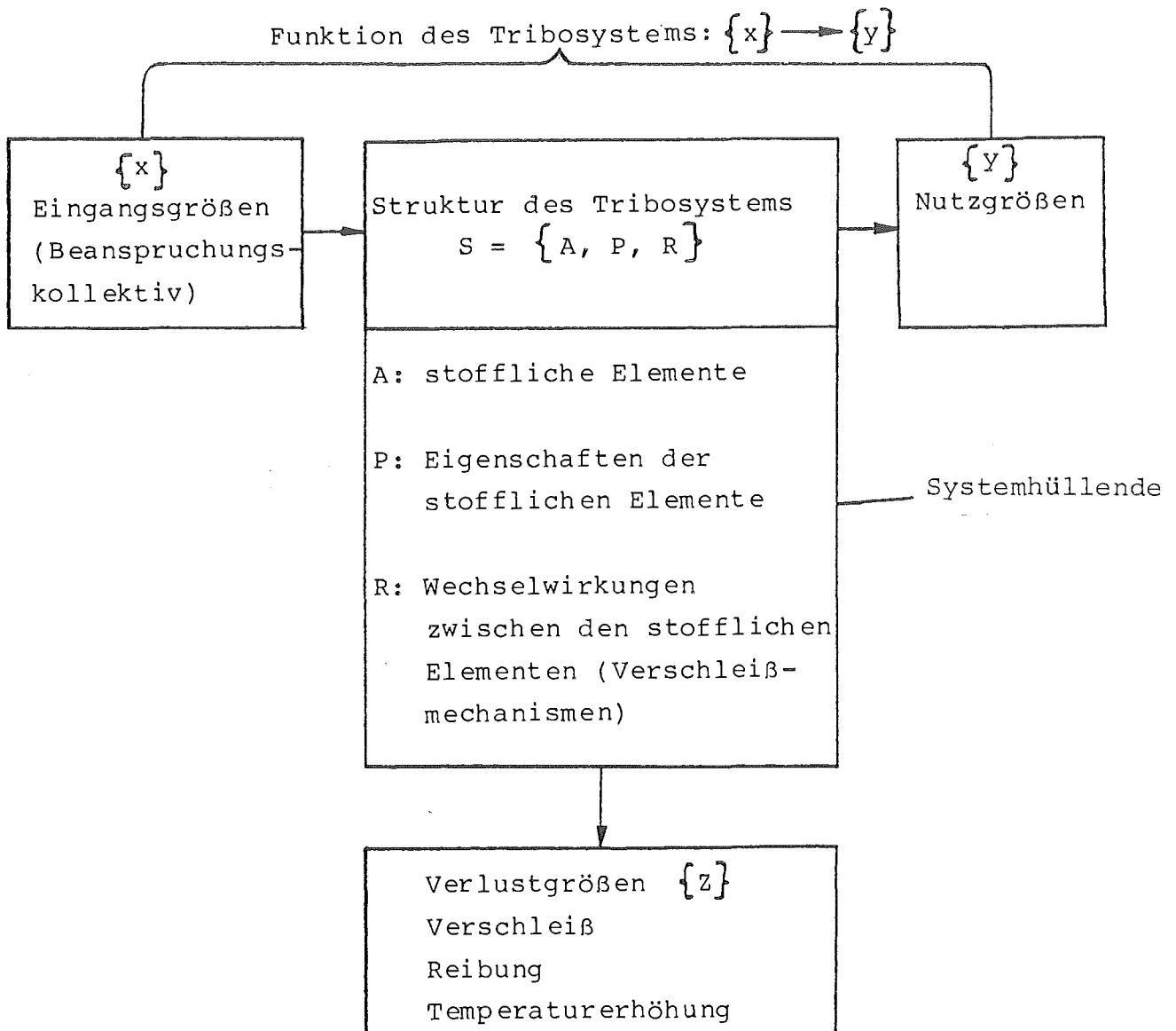


Bild 1: Schematische Darstellung eines tribologischen Systems nach Czichos (1974)

Der Schichtaufbau der keramischen Schichten unterscheidet sich davon durch eine weniger ausgeprägte chemische Adsorption und Störzone. An den genannten Schichten spielt sich der Verschleiß

Grundkörper	Gegenkörper	Zwischenstoff	Umgebungsmedium
1. Volumeneigenschaften		Aggregatzustand:	Aggregatzustand:
1.1 Stoffeigenschaften		a) fest	a) flüssig
1.1.1	chemisch	1. Stoffeigenschaften	1. Stoffeigenschaften
1.1.2	physikalisch	1.1 chemisch	1.1 chemisch
1.1.3	gefügemäßig	1.2 physikalisch	1.2 physikalisch
1.1.4	mechanisch- technologisch	1.3 gefügemäßig	b) gasförmig
1.2 Formeigenschaften		1.4 mechanisch- technologisch	1. Stoffeigenschaften
1.2.1	Gestalt, Abmessungen	2. Formeigenschaften	1.1 chemisch
2. Oberflächeneigenschaften		2.1 Gestalt, Abmessungen	1.2 physikalisch
2.1 Stoffeigenschaften		b) flüssig	
2.1.1	chemisch	1. Stoffeigenschaften	
2.1.2	physikalisch	1.1 chemisch	
2.1.3	gefügemäßig	1.2 physikalisch	
2.1.4	mechanisch- technologisch	c) gasförmig	
2.2 Formeigenschaften		1. Stoffeigenschaften	
2.2.1	Rauheit	1.1 chemisch	
2.2.2	Dicke von Ober- flächenschichten	1.2 physikalisch	

Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften der Elemente von Tribosystemen nach Habig /1/

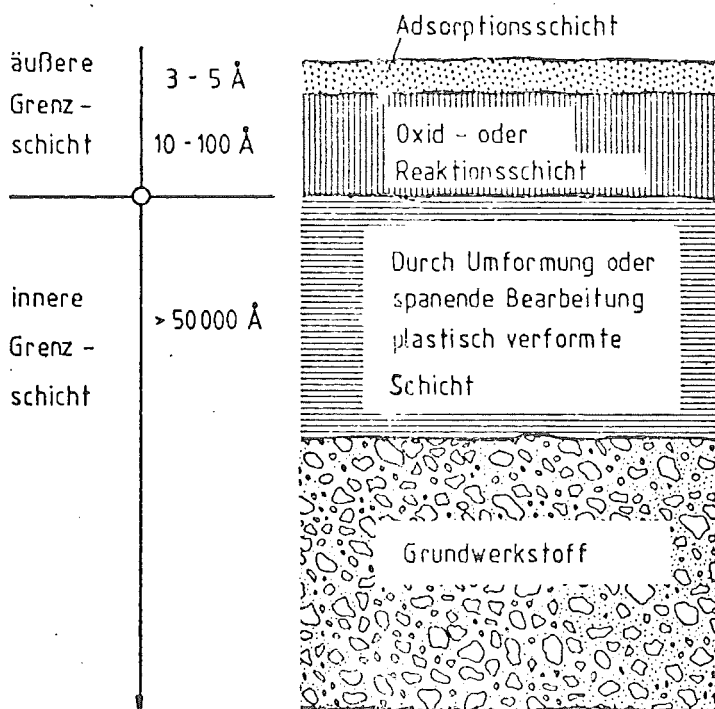
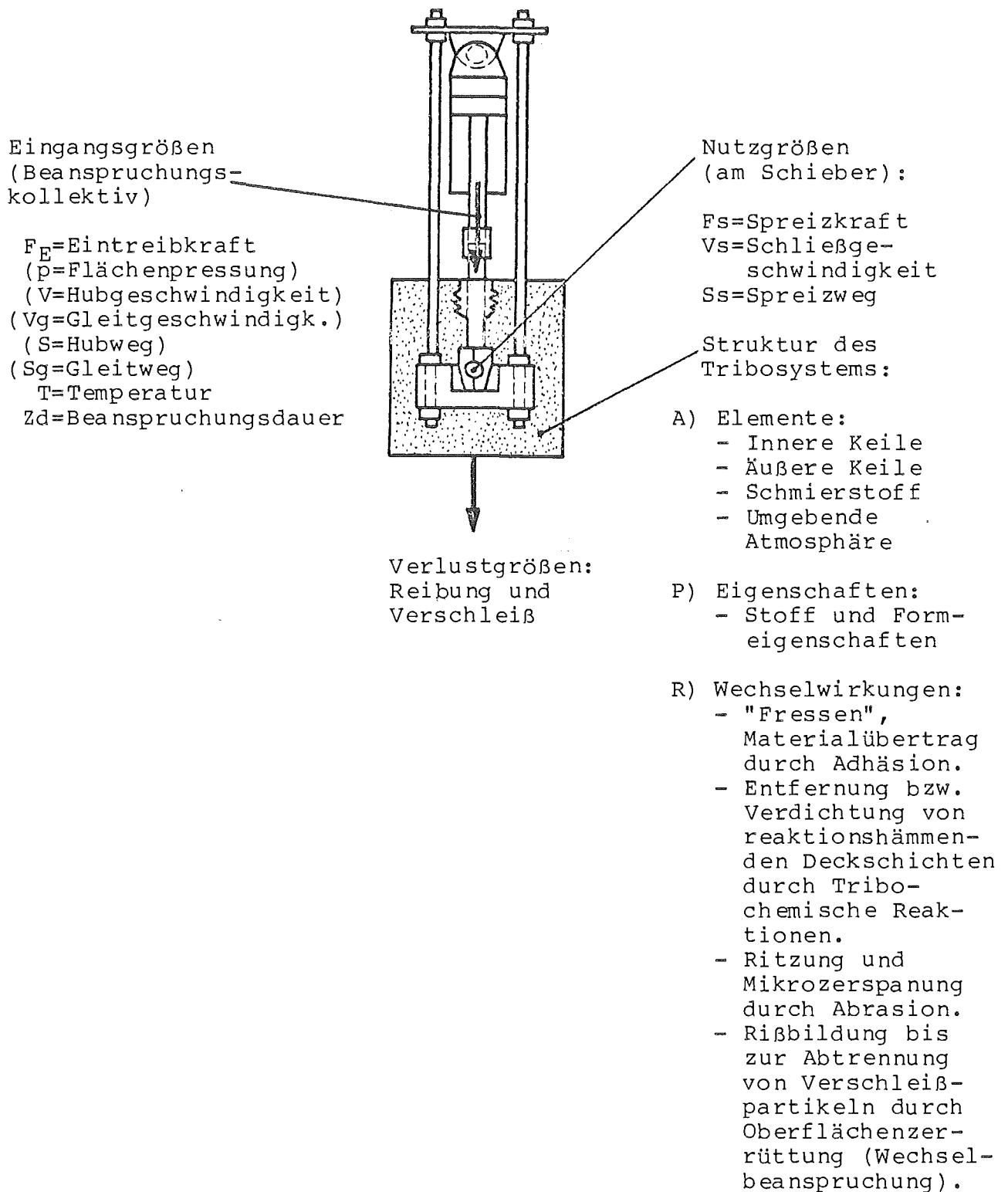


Bild 2: Aufbau der Oberflächenbereiche von metallischen Werkstoffen nach Schmalz



Bild 3: "Keil-in Keil"-Mechanismus als Beispiel  
für ein tribologisches System.



der wesentlich von der Tiefenwirkung der tribologischen Beanspruchung abhängt, eines Festkörpers ab. Wird nur die äußere Grenzschicht erfaßt, so ist der Verschleiß in der Regel gering, man spricht von leichtem Verschleiß oder Schichtverschleiß. Schwerer Verschleiß tritt dagegen auf, wenn die tribologische Beanspruchung zur Abtrennung von Verschleißpartikeln aus der inneren Grenzschicht führt.

Die von außen einwirkenden Eingangsgrößen, die das Beanspruchungskollektiv bilden und durch folgende Größen und Begriffe gekennzeichnet sind:

Bewegungsform,  
Bewegungsablauf,  
Belastung,  
Geschwindigkeit,  
Temperatur und  
Zeit

werden durch die Struktur in Nutzgrößen umgewandelt. Dabei treten die Verlustgrößen Reibung und Verschleiß auf.

Diese abstrakt gehaltene Darstellung wird am Beispiel des "Keil-in-Keil"-Mechanismus, Bild 3, dargestellt.

Durch die kombinierte Wirkung des Beanspruchungskollektiv

$F_E(p)$ ,  $V(V_g)$ ,  $S(S_g)$ ,  $T$ ,  $Z_d$  und die tribologischen Wechselwirkungen in der Kontaktgrenzfläche ergeben sich Strukturveränderungen, die den Reibungswert und das funktionelle Verhalten des tribologischen Systems verändern. Dieses Beispiel macht deutlich, daß die Reibungskenngröße der "Keil-in-Keil"-Gleitpaarung nicht als Werkstoffeigenschaft, sondern als Systemeigenschaft behandelt werden muß. In symbolischer Form läßt sich schreiben:

Reibungskraft = f (Beanspruchungskollektiv; Systemstruktur)

d.h.

$$\mu = f (p, Vg, Sg, T, Zd, S)$$

p = Flächenpressung

Vg = Gleitgeschwindigkeit

Sg = Gleitweg

T = Temperatur

Zd = Beanspruchungsdauer

S = (A, P, R)    A = Elemente des Tribosystems

                  P = Eigenschaft der Elemente

                  R = Wechselwirkung der Elemente

### 2.1.2 Die Verschleißmechanismen

Vier Verschleißmechanismen werden heute weithin als besonders wichtig angesehen:

- Adhäsion
  - Tribooxidation
- } stoffliche Wechselwirkung zwischen den  
am Verschleiß beteiligten Elementen
- 
- Abrasion
  - Oberflächenzerrüttung
- } Wechselwirkungen, die auf kräfte- bzw.  
spannungsmäßigen Wechselwirkungen be-  
ruhen
- 
- Adhäsion:  
Ausbildung und Trennung von Grenzflächenhaftverbindungen  
("Fressen", "Festfressen bzw. Kaltverschweißen").

Fragt man nach den Bedingungen, unter denen die Adhäsion auftreten kann, so ist zu antworten, daß Gleitpaarungen, die

nicht geschmiert sind, besonders gefährdet sind. Hierbei neigen insbesondere Paarungen aus metallischen Werkstoffen zur Adhäsion, während bei Paarungen aus keramischen und polymeren Werkstoffen die Adhäsion weniger wirksam ist.

Die Adhäsion tritt in den Mikrokontaktbereichen der Gleitflächen auf. In den Kontaktflächen herrschen erhebliche mechanische Spannungen, die durch tangentielle Relativbewegungen der Gleitpartner noch verstärkt werden. Dadurch können auf der Oberfläche haftende Adsorptions- und Reaktionsschichten, wie sie in Bild 2 gezeigt wurden, zerstört werden, so daß zwischen "nackten Oberflächen", insbesondere zwischen reinmetallischen Berührungsstellen, atomare Bindungen mehr oder weniger großer Festigkeit entstehen. Diese atomaren Bindungen müssen bei einer Relativbewegung gelöst werden. Die dazu benötigten Kräfte bzw. Energien sind hauptsächlich für die Reibung verantwortlich. Für den Verschleiß ist von Bedeutung, daß die Abscherung der Bindungen nicht immer in den ursprünglichen Kontaktflächen, sondern in den angrenzenden Oberflächenbereichen der Gleitpartner erfolgen kann, so daß Werkstoff von einem Partner auf den anderen übertragen wird. Man nennt diesen Vorgang auch Materialübertrag.

- Tribochemische Reaktionen:

(Tribooxidation, Triboreduktion)

Entstehung von Reaktionsprodukten durch die Wirkung von tribo-  
logischer Beanspruchung bei chemischer Reaktion von Grundkörper, Gegenkörper und angrenzenden Medium (lose Verschleißpartikel).

Durch die tribochemischen Reaktionen ändern sich vor allem die Eigenschaften der äußeren Grenzschicht (Bild 2). Eine Abnahme

des Verschleißes ist besonders dann möglich, wenn die Reaktionsschichten einen unmittelbar metallischen Kontakt von Grund- und Gegenkörper verhindern, so daß die Wirkung der Adhäsion, die zu schwerem metallischen Verschleiß führen kann, eingeschränkt wird.

Für die Bildung von losen Verschleißpartikeln reicht die tribochemische Reaktion - Tribooxidation - nicht aus; zusätzlich müssen die Abrasion oder die Oberflächenzerrüttung wirksam werden.

- Abrasion:

Materialabtrag durch ritzende und mikrozerspanende Beanspruchung (Riefen-, Mikrospanbildung)

Abrasion tritt auf, wenn Rauheitshügel des Gegenkörpers oder Partikel, die als Zwischenstoff oder ebenfalls als Gegenkörper - bzw. auch Abtrennung von Partikeln aus den beanspruchten Oberflächenbereichen - in die Oberfläche des Grundkörpers eindringen und gleichzeitig eine Tangentialbewegung ausführen. Vom Erscheinungsbild her ist die Abrasion durch Riefen zu erkennen, in denen sich vielfach Mikrospäne befinden. Bei spröden Werkstoffen kommen Ausbröcklungen dazu. In Abhängigkeit von der Härte der am Verschleiß beteiligten Elemente kann erheblicher Verschleiß auftreten.

- Oberflächenzerrüttung:

Ermüdung, Rißbildung und Rißwachstum bis zur Abtrennung von Verschleißpartikeln infolge wechselnder Beanspruchung ("Grübchen", "Löcher")

Die Oberflächenzerrüttung kann ebenso wie die Abrasion an allen Werkstoffen auftreten. Im Unterschied zur Abrasion, bei



der durch einen einzigen Beanspruchungsvorgang Verschleißpartikel gebildet werden können, geht der Oberflächenzerüttung in der Regel eine längere Inkubationszeit voraus, in der es zu keinem meßbaren Verschleiß kommt. In dieser Zeit wird die Bildung von Verschleißpartikeln durch Gefügeänderungen sowie Rißbildungs- und Rißwachstumsvorgänge vorbereitet.

### 3. Auswirkungen im Vakuum und in Helium-Atmosphäre

Der Einfluß der Atmosphäre auf die Funktion eines dynamischen Maschinenelementes ist nur dadurch zu ermitteln, daß das komplette Maschinenelement unter tribologischen Gesichtspunkten in Form einer Systemanalyse, wie es in Abschnitt 2.1.1, Bild 1, Tabelle 1, dargestellt ist, betrachtet werden muß. Außer den genannten Verschleißmechanismen und einem Zwischenstoff, von dem eine schützende oder auch eine schädigende Wirkung denkbar ist, sind Wechselwirkungen des umgebenden Mediums mit dem Zwischenstoff und mit dem Grund- und Gegenkörper möglich (Bild 3).

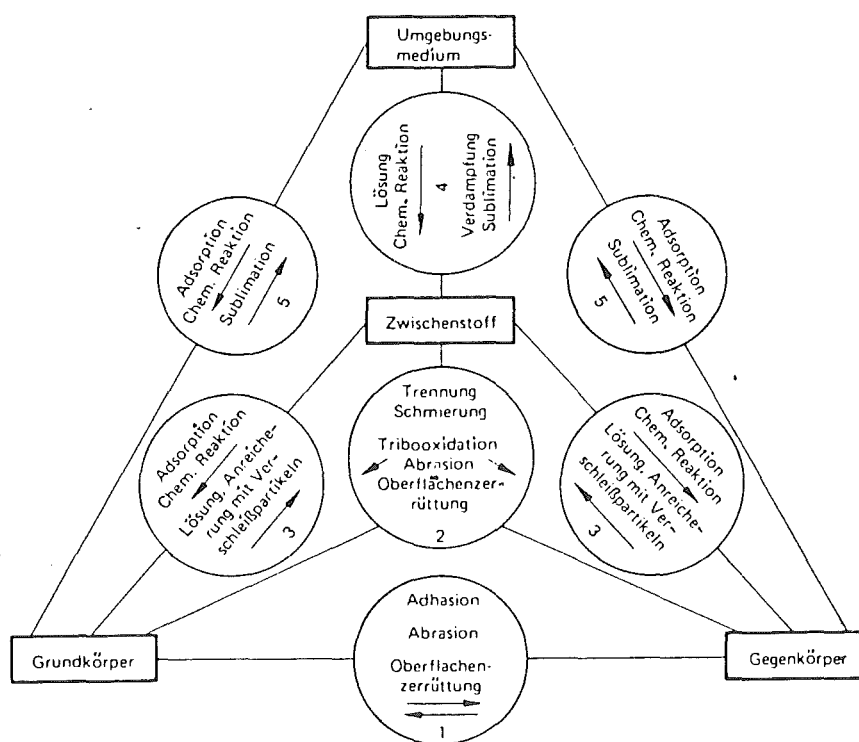


Bild 3: Wechselwirkung zwischen den Elementen von Tribosystemen nach Habig /1/

Aus den unmittelbaren Wirkungen der Helium-Atmosphäre und des Vakuums können weitere mittelbare auf andere Elemente resultieren, da die unmittelbar betroffenen Elemente ihre stofflichen Eigenschaften verändern.

Als Edelgas geht Helium keine chemischen Verbindungen ein, so daß eine Helium-Atmosphäre, die stets ideal rein gehalten wird, unmittelbar nur physikalische Effekte bewirkt:

- Die Einlagerung von Helium in Gitterstrukturen und an Korngrenzen von Metallen durch Diffusion kann im Temperaturbereich  $\leq 100^{\circ}\text{C}$  bei technischen Problemstellungen vernachlässigt werden.
- Alle physikalisch adsorbierten Oberflächenschichten, die nicht aus Helium bestehen, lösen sich auf. Die Auflösung verläuft um so gründlicher, je höher die Temperatur ist.
- Alle Flüssigkeiten und Festkörper verdampfen und sublimieren kontinuierlich, da sich kein Partialdruck und erst recht kein Sättigungsdruck der abgedampften Substanzen wegen der Reinhaltung des Heliums bilden kann.
- Der Gasdruck des Heliums beeinflusst die Geschwindigkeit von Verdampfung und Sublimation.
- Helium kann Wärme aufnehmen und von einem Körper auf einen anderen übertragen.

Gegenüber den stets vorhandenen reaktionsfähigen Restgasen im gereinigten Helium liegen die Partialdrücke der "Verunreinigungen" im HTR-(Hochtemperatureaktor)-Helium z.T. erheblich höher. Sie verursachen üblicherweise chemische Reaktionen (Reduktion, Oxidation) die für die Funktion eines Tribosystems bedeutsam sein können.

Im Vakuum ist die Rollenverteilung ähnlich. Das ideale Vakuum verursacht nur physikalische Effekte und das Restgas ist für eventuelle chemische Reaktionen verantwortlich. Die Unterschiede bestehen jedoch darin, daß im idealen Vakuum keine Einlagerungen, kein Druckaufbau und auch keine Wärmeaufnahme und keine Wärmeleitung durch Gase möglich sind.

Der wesentliche Unterschied zwischen Vakuum bei einem Druck von  $10^{-7}$  mbar und HTR-Helium liegt in der Konzentration als auch in der Zusammensetzung der Gaskomponenten.

Gaszusammensetzung:

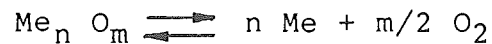
Partialdrücke

Gaskomponenten	HTR-Gas μbar	Vakuum bei $10^{-7}$ mbar μbar
N <sub>2</sub>	5	$1,2 \times 10^{-3}$
O <sub>2</sub>		$1,2 \times 10^{-3}$
H <sub>2</sub>	500	$2,5 \times 10^{-3}$
H <sub>2</sub> O	1,5	$5 \times 10^{-3}$
CO	15	
CH <sub>4</sub>	20	
Helium	Rest	

Dem Bildungs- und Zersetzungsprozeß von Oxiden liegt das Massenwirkungsgesetz zugrunde. Art und Richtung der chemischen Reaktion lassen sich nur für Metalle sowie definierte anorganische und organische Verbindungen bestimmen, die von einer tribologischen Beanspruchung unbeeinflusst sind.

Für eine theoretische Grundlage werden zunächst einige dieser Abläufe aufgezeigt.

- Der Oxidationsprozeß eines Metalls mit Sauerstoff läßt sich in allgemeiner Form durch die folgende Beziehung darstellen:



Der Ablauf dieser Reaktion in eine der beiden Richtungen ist von der Gleichgewichtskonstante abhängig, die für diese Reaktion die Form hat

$$K_{gl} = \frac{p_{\text{Me}}^n \cdot p_{\text{O}_2}^{m/2}}{p_{\text{Me}_n \text{O}_m}}$$

Der Wert K ist für das jeweils betrachtete Gleichgewicht charakteristisch und außer dem Druck von der Temperatur abhängig.

Die Gleichung enthält die Konzentration der am Oxidationsprozeß beteiligten Stoffe durch ihre Partialdrücke ausgedrückt. Es bedeuten:

$p_{\text{Me}}$	-	Dampfdruck des Metalls
$p_{\text{O}_2}$	-	Dampfdruck des Sauerstoffes
$p_{\text{Me}_n \text{O}_m}$	-	Dampfdruck des Oxides

Wenn man den Dampfdruck der festen Phasen Metall und Metalloxid in erster Näherung als konstant und von der Temperatur unabhängig annimmt, kann die Gleichgewichtsbedingung für diese umkehrbare Reaktion in der Form geschrieben werden

$$K_{gl} = p_{\text{O}_2}.$$



Bezeichnet man den Partialdruck des Sauerstoffes in einer umgebenden Atmosphäre mit  $p'_{O_2}$ , so bedeutet dies:

$p'_{O_2} > K$  Oxidschicht wächst,

$p'_{O_2} < K$  Oxidschicht wird zu Metall und gasförmigen Sauerstoff zersetzt.

- Das in der umgebenden Atmosphäre resultierende Verhältnis von  $H_2$  zu  $H_2O$  kann sowohl Oxidation als auch Reduktion bewirken. Der Ablauf dieser umkehrbaren Reaktion zeigt die Gleichung:



Die Gleichgewichtskonstante läßt sich hier in der Form schreiben:

$$K_g^1 = \left( \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}} \right)^n$$

$p_{H_2O}$  - Partialdruck Wasserdampf  
 $p_{H_2}$  - Partialdruck Wasserstoff

Der vorhandene Wasserstoff kann unter bestimmten Bedingungen (Temperatur, Zeit) zu weiteren Reaktionen führen. So können z.B. Karbide reduziert oder Randzonen von Stählen entkohlt werden.

- Der Ablauf der umkehrbaren Reaktion mit Kohlenmonoxid wirkt sich ähnlich aus.



Die Richtung der Reaktion ist vom Verhältnis  $p_{\text{CO}}$  zu  $p_{\text{CO}_2}$  in der umgebenden Atmosphäre abhängig. Auch hier sind die Wechselwirkungen mit dem Grundwerkstoff zu beachten.

Für die Abschätzung der Reaktionsabläufe kann das Diagramm der Bildungsenthalpien von Oxiden nach Richardson und Jeffes herangezogen werden.

Für die angegebenen Atmosphären (Vakuum, HTR-Gas) sind nach bisherigen Betrachtungen einige Aussagen möglich:

- Bei Raumtemperatur führen auch sehr kleine  $\text{O}_2$ -Partialdrücke ( $p_{\text{O}_2} < 10^{-40}$  bar) bei allen üblichen Metallen zur Oxidation. Bei Umgebungsbedingungen ( $p_{\text{O}_2} = \text{constant}$ ,  $t \geq t_0$ ), die über den Gleichgewichtszustand liegen, wird der Oxidationsvorgang mit steigender Temperatur beschleunigt.
- Das  $\text{H}_2$  zu  $\text{H}_2\text{O}$ -Verhältnis von  $500 : 1,5 = 333$  in der HTR-Atmosphäre wird in einem stationären System bei Raumtemperatur je nach Art des Eisenoxids zu einer weiteren Oxidation oder zu einer weiteren Reduktion führen. Die Oxidschicht z.B. von Nickel und Kobalt wird wachsen, während Chrom- und Vanadiumoxid reduziert werden.
- Durch die höhere Konzentration an reaktiven Komponenten werden im HTR-Helium die chemischen Reaktionen schneller verlaufen als im Vakuum.
- Auskohlen oder Aufkohlen der Oberflächen sowie eine Nitrierung ist möglich.
- Es können nur solche Zwischenstoffe verwendet werden, deren Bestandteile einen ausreichend geringen Dampfdruck bei der Betriebstemperatur aufweisen, weil alle Flüssigkeiten und Festkörper kontinuierlich verdampfen und sublimieren (Metalle, Bild 4). Das gilt bei Langzeiteinsatz insbesondere für Öle und

Fette, deren Dampfdruck/10/ meist um viele Größenordnungen höher liegen als der von Festkörpern. Dabei sind homogene Öle den Fetten meist vorzuziehen, da die Öle nur in der Menge abnehmen, nicht aber ihre Eigenschaften verändern. Fette sind stets inhomogen und enthalten daher auch stets Substanzen, die schneller verflüchtigen als andere, so daß sich die Fette mit der Zeit irreversibel verfestigen. Hier haben sich vor allem Festschmierstoffe (anorganische Verbindungen wie  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ , Bild 5) bewährt. Im weiteren Sinne werden hierzu auch selbstschmierende Kunststoffe wie Polytetrafluoräthylen (PTFE, Bild 6) gezählt, das bei niedrigen Temperaturen geringe Verdampfungsverluste aufweist. Diese Verbindungen, z.B.  $\text{MoS}_2$ , eignen sich in Pulverform aufgetragen nicht als Schmierstoff. Sie neigen zum Plattieren, wobei ein Abblättern der Plattierung schließlich zur Zerstörung von Mechanismen führt. Um den Nachteil zu beheben, werden Festschmierstoffe z.B. in Form von anorganischen Gleitlacken (Bild 7 und 8) eingesetzt. Graphit ist, wie bekannt, infolge des Fehlens adsorbierter Wasserdampfschichten als Schmierstoff im Vakuum und Helium ungeeignet.

Der Begriff Zwischenstoff ist deshalb gewählt, da er mehr umfassen soll als der konventionelle Begriff Schmiermittel. Als Zwischenstoff sind nämlich auch Metalle, Kunststoffe, Keramiken oder irgendwelche Mischkörper denkbar.

- Oxidschichten können je nach Art und Paarung eine Schutzwirkung ausüben oder auch zu stärkerem Verschleiß führen.
- Verschleißprodukte können als Metalle, Oxide, Carbide, Nitride oder als Mischkristalle davon auftreten.

# Verdampfbarkeit einiger Metalle im Vakuum nach Wunsch /2/

Vakuum:  $8,0 \cdot 10^{-7}$  bis  $2,0 \cdot 10^{-6}$  Torr

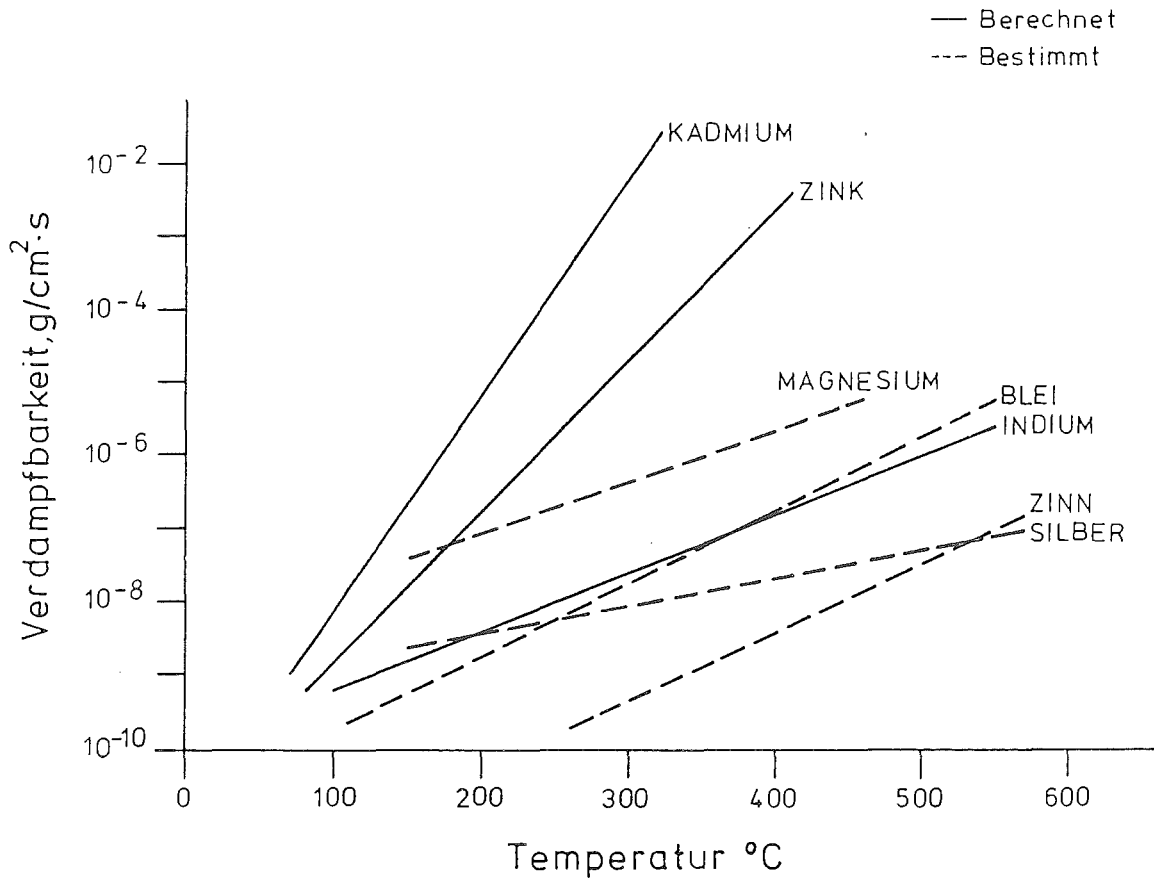


Bild 4

# Verdampfbarkeit einiger Festschmierstoffe nach Wunsch /2/

im Vakuum

Vakuum:  $8,0 \cdot 10^{-7}$  bis  $2,0 \cdot 10^{-6}$  Torr

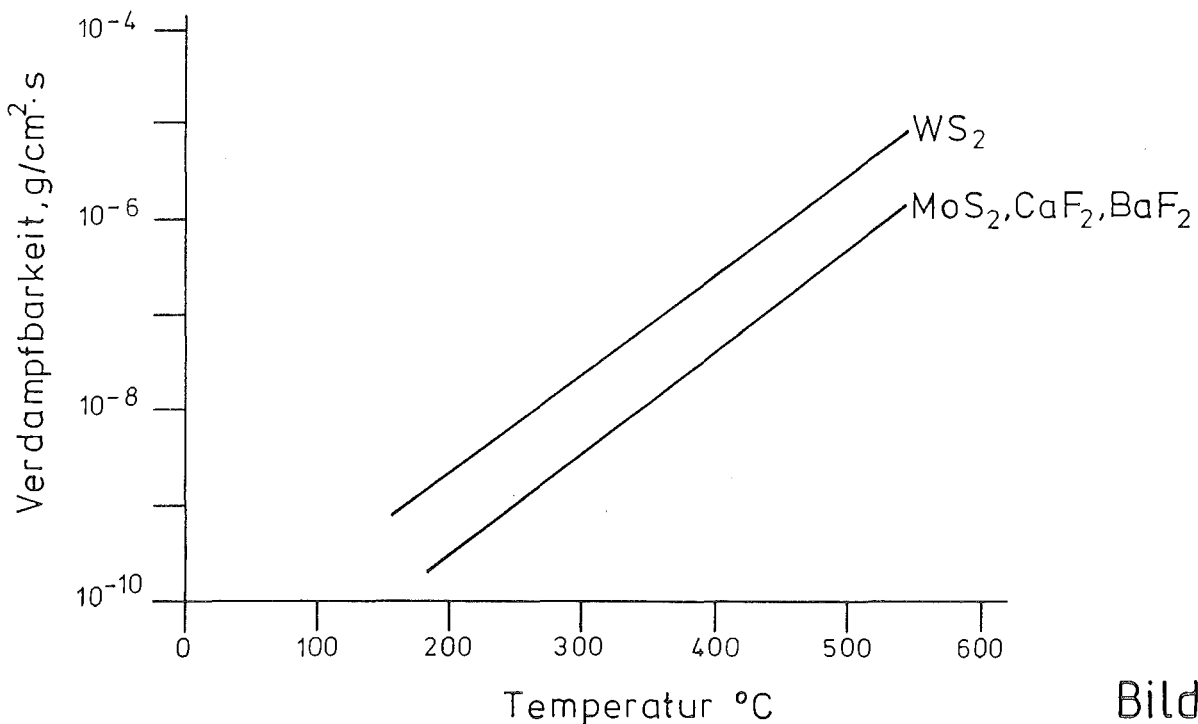


Bild 5

Verdampfbarkeit von Polytetrafluoräthylen nach Wunsch /2,

Vakuum:  $8,0 \cdot 10^{-7}$  bis  $2,0 \cdot 10^{-6}$  Torr

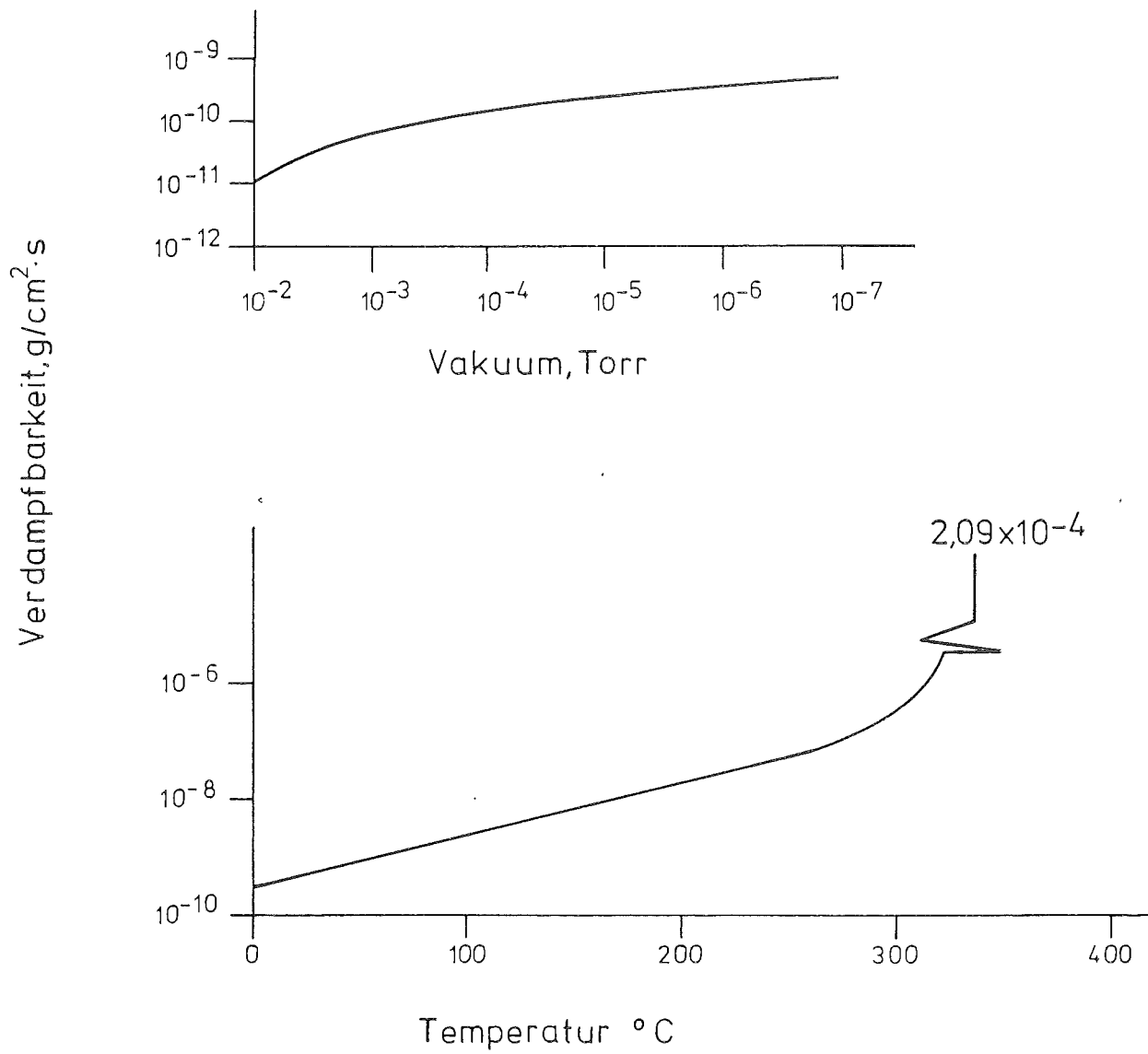


Bild 6

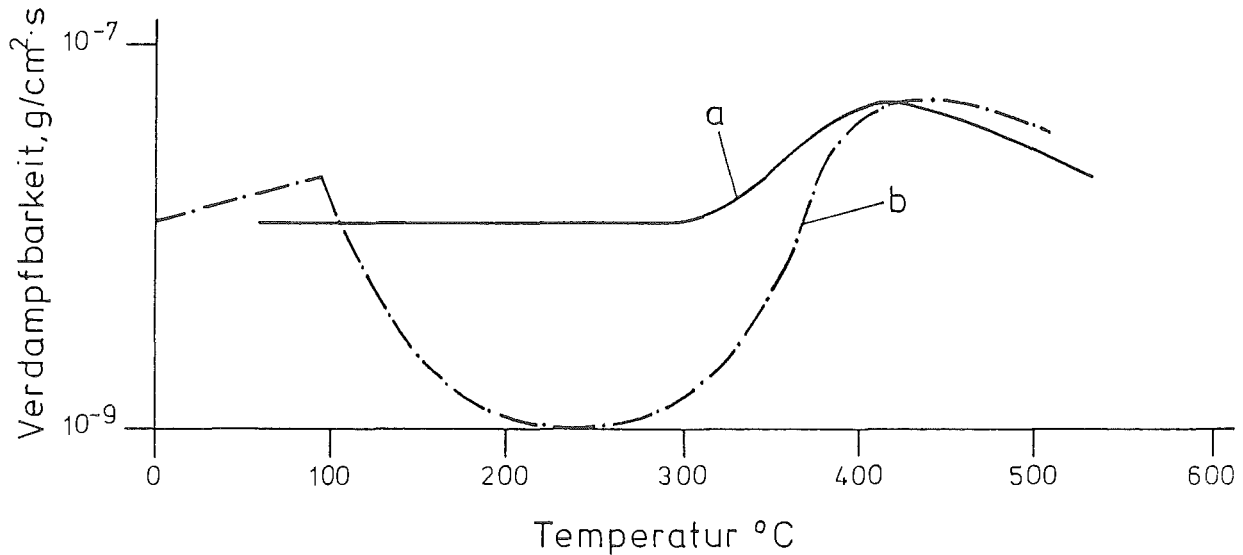
Verdampfbarkeit eines  $\text{MoS}_2$ -Siliconharz-sowie eines

$\text{MoS}_2$ -epoxidischen Phenolharz-Gleitlackes nach Wunsch /2/

Lagerwerkstoff: Chrom-Nickel-Legierung

Filmdicke: 25 Mikron

Vakuum:  $1,0$  bis  $2,0 \cdot 10^{-6}$  Torr



a)  $\text{MoS}_2$ -Siliconharz-Gleitlack

b)  $\text{MoS}_2$ -epoxidischer -Phenolharz-Gleitlack

Bild 7

Verdampfbarkeit eines  $\text{MoS}_2$ - $\text{SiO}_2$ -Überzuges nach Wunsch /2/.

Lagerwerkstoff: Chrom-Nickel-Legierung

Filmdicke: 25 Mikron

Vakuum:  $1,0$  bis  $2,0 \cdot 10^{-6}$  Torr

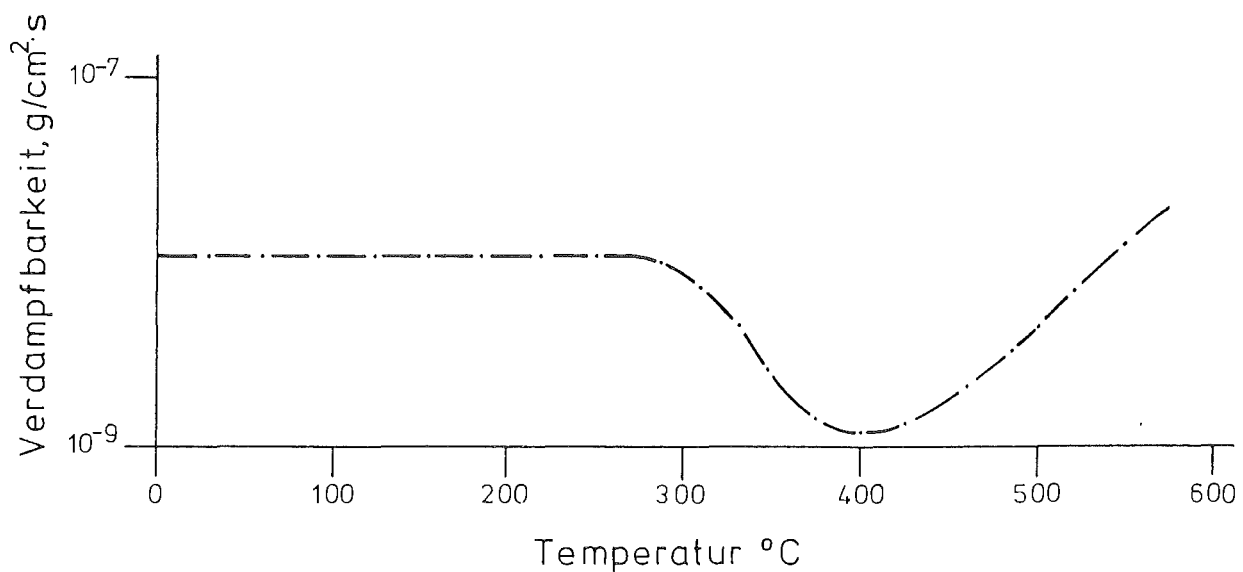


Bild 8

Werden Werkstoffe tribologisch beansprucht, so können Reaktionen ablaufen, die nach den bekannten thermodynamischen Daten nicht zu erwarten sind. Für die Beschleunigung des Reaktionsablaufes können unterschiedliche Prozesse verantwortlich sein:

- Entfernung von reaktionshemmenden Deckschichten (physikalisch, chemisch, mechanisch).
- Beschleunigung des Transportes der Reaktionsteilnehmer
- Vergrößerung der reaktionsfähigen Oberfläche
- Temperaturerhöhung infolge der Reibungswärme
- Entstehung von Oberflächenatomen mit freien Valenzen infolge von Gitterstörungen, die durch plastische Deformationsprozesse hervorgerufen werden.

#### 4. Versuchsaufbau

Die Versuchseinrichtung (Bild 9), in der die inneren und äußeren Keile angeordnet sind, ist in einem Rezipienten von ca. 24 l Innenvolumen untergebracht. Die Kammer läßt sich in einer Turbo-Molekularpumpe, Saugvermögen ca. 900 m<sup>3</sup>/h, auf einen Druck von einigen 10<sup>-9</sup> mbar evakuieren; hierzu ist jedoch ein mehrstündiges Ausheizen des gesamten Rezipienten auf 300°C erforderlich. Unter den untersuchten Materialkombinationen befanden sich einige mit Schmierstoffen überzogene Reibpartner. Da die Ausgasung der eingebrachten Schmierstoffe bei dieser Temperatur beträchtlich zunimmt, mußte auf eine Ausheizung verzichtet werden, so daß ein Enddruck von max. 5 x 10<sup>-8</sup> mbar erreicht wurde.

Die beiden inneren Keile werden mittels eines ölhydraulischen Antriebs (Bild 10) unter einem Öffnungswinkel von 30° in einer Druck-Zug-Bewegung in die zwei äußeren Keile wechselweise eingetrieben und herausgezogen.

Die freie Aufhängung beider inneren Keile und ihre kugelgelenkartige Lagerung verhindern während des Ein- und Ausfahrvorganges ein gegenseitiges Verkanten der Keilpaare. Das Haltejoch, in dem die beiden äußeren Keile eingelegt sind, ist an beiden Auflagestellen so eingespannt, daß es horizontal beweglich ist. Die Hubgeschwindigkeit sowie die aufzubringende Ein- und Austreibkraft sind über eine Steuereinheit am Hydraulikaggregat einstellbar und lassen sich stufenlos regeln. Ein freiprogrammierbares Schaltwerk steuert den zeitlichen Ablauf des Versuchs.

Zwei Präzisions-Dehnungsmeßsteifen sind mittig am Haltejoch befestigt und zu einer Halbbrücke zusammengeschaltet. Die beiden aktiven Streifen registrieren die Ausbiegung des Jochs im festeingefahrenen Zustand der Keilpaare, wobei die Dehnungsänderungen ein Maß für die Reibkraft sind.



Diese Pause unterliegt – nicht – dem Änderungsdienst

Für diese Zeichnung beanspruchen wir alle Urheberrechte auch für den Fall der Patentanmeldung oder Gebrauchsmusterantragung. Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte nur nach unserer vorherigen Zustimmung.

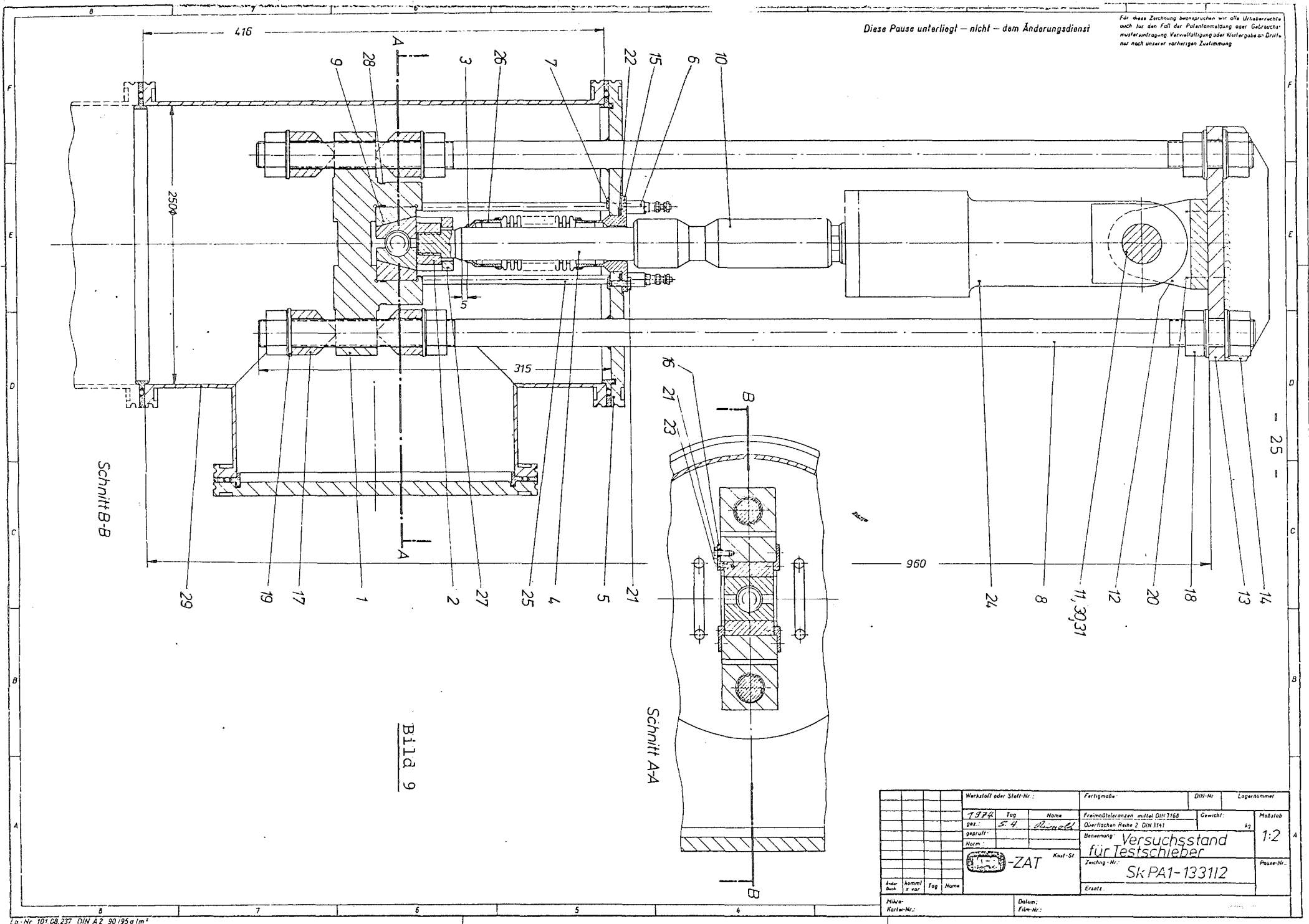
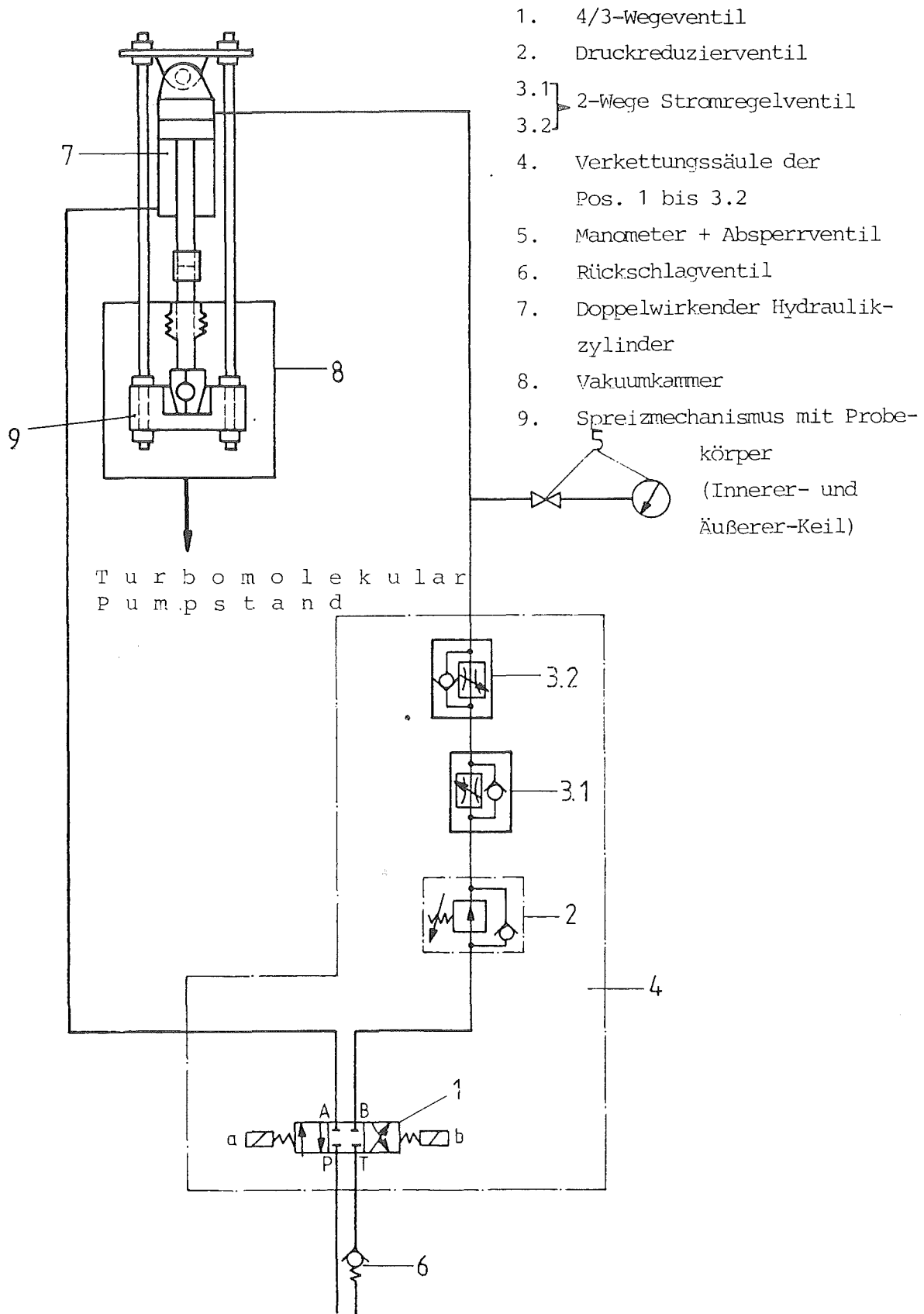


Bild 9

Schnitt A-A

Schnitt B-B

Werkstoff oder Stoff-Nr.:		Fertigmaße		DIN-Nr.	Lagernummer
1374	Tag	Name	Freimittelerzeugnisse, mittel DIN 1168	Gewicht:	Maßstab
St. 4	5. 4.	Rundschliff	Oberflächen Raue 2 DIN 1161	kg	1:2
geprüft:			Benennung	Versuchsstand für Testschieber	
Norm:			Zeichung-Nr.	Sk PA1-133112	
			Kauf-St	Ersatz:	
Inter-Buch	Samml.	Tag	Name	Datum:	
Mikro-	Karte-Nr.:			Film-Nr.:	



Schematischer Aufbau der Versuchseinrichtung

Bild 10

In Bild 11 ist das Verrohrungssystem für den Betrieb mit PNP-Gas dargestellt. Ein- und Ausgang des PNP-Gases sind so angeordnet, daß die Reibpaarungen kontinuierlich von Gas umströmt werden. Der Feuchtegehalt im Gas kann mit einem H<sub>2</sub>O-Befeuchter eingestellt werden.

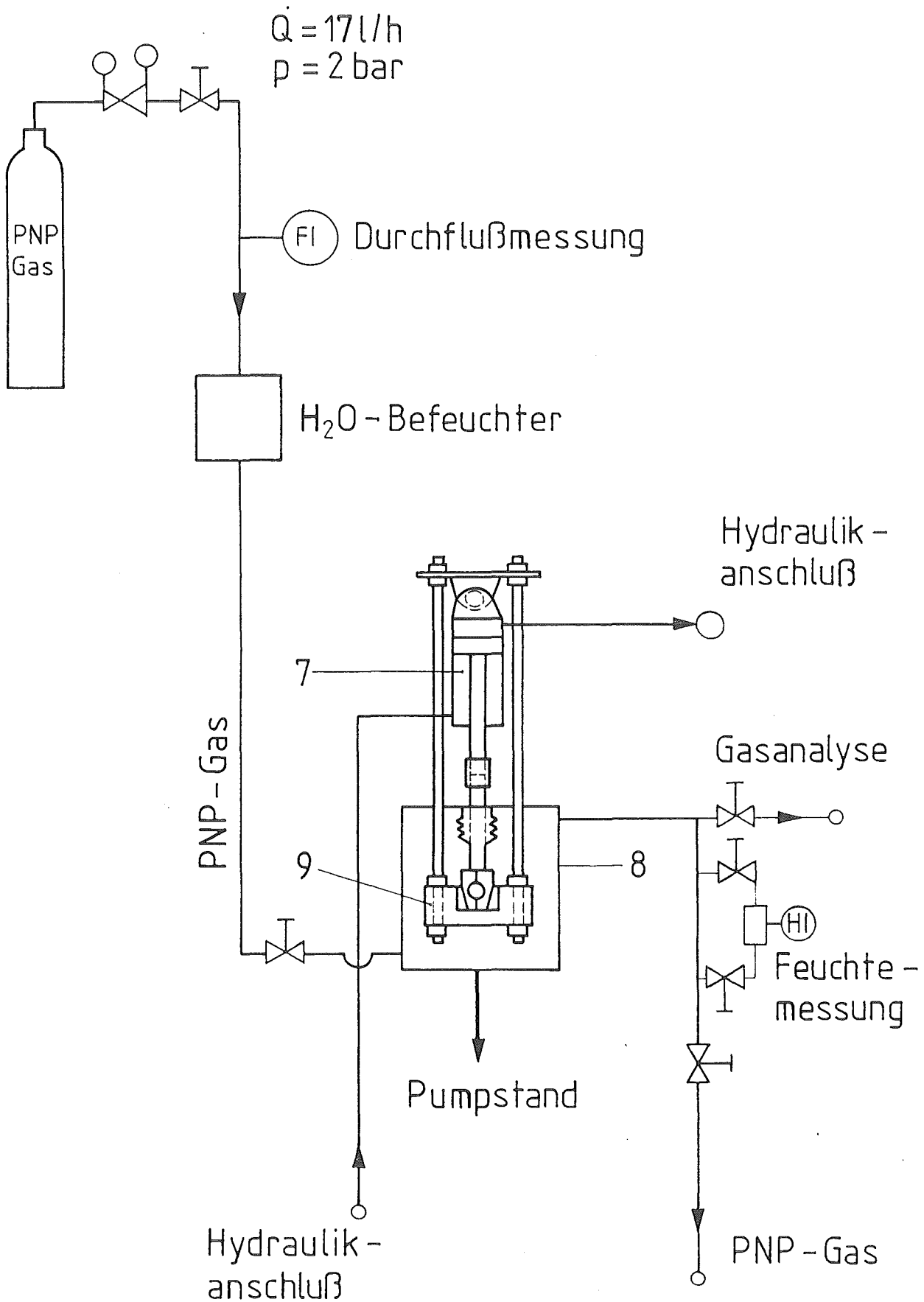


Bild 11: Verrohrungssystem des Teststandes

## 5. Durchführung der Versuche

Alle Reib- und Verschleißuntersuchungen an den Materialpaarungen werden bei Raumtemperatur in PNP-Gas und z.T. im Vakuum bei  $5 \times 10^{-7}$  bis  $5 \times 10^{-8}$  mbar gefahren.

Vor Versuchsbeginn wird die Oberflächenbeschaffenheit (Ebenheit, Rauigkeit) der Reibflächen bestimmt. Die Keile und Kalottenteile (Bild 12) werden vor dem Einbau in den Rezipienten - ausgenommen die mit Festschmierstoff behandelten Flächen - einer gründlichen Reinigung mit Azeton unterzogen.

Der chronologische Versuchsablauf erfolgt in vier Schritten:

- a) Einfahren der beiden inneren Keile in die im Haltejoch eingelegten äußeren Keile,
- b) Haltezeit von ca. 15 sec im festverkeilten Zustand,
- c) Ausfahren der inneren Keile,
- d) Haltezeit von ca. 5 sec im gelösten Zustand.

In der unteren Endstellung werden die Probekörper über die gesamte Haltezeit von 15 sec mit konstanter Belastung beaufschlagt.

Während eines Versuchslaufes werden die (der)

- Reibkoeffizienten
- Spielzahl (Anzahl der Wechselbelastungen)
- Temperatur im Rezipient
- Gasdruck (Betrieb unter PNP-Gas)
- Gasfeuchte (Betrieb unter PNP-Gas)

kontinuierlich gemessen und gespeichert. Die Gaszusammensetzung wird diskontinuierlich kontrolliert.

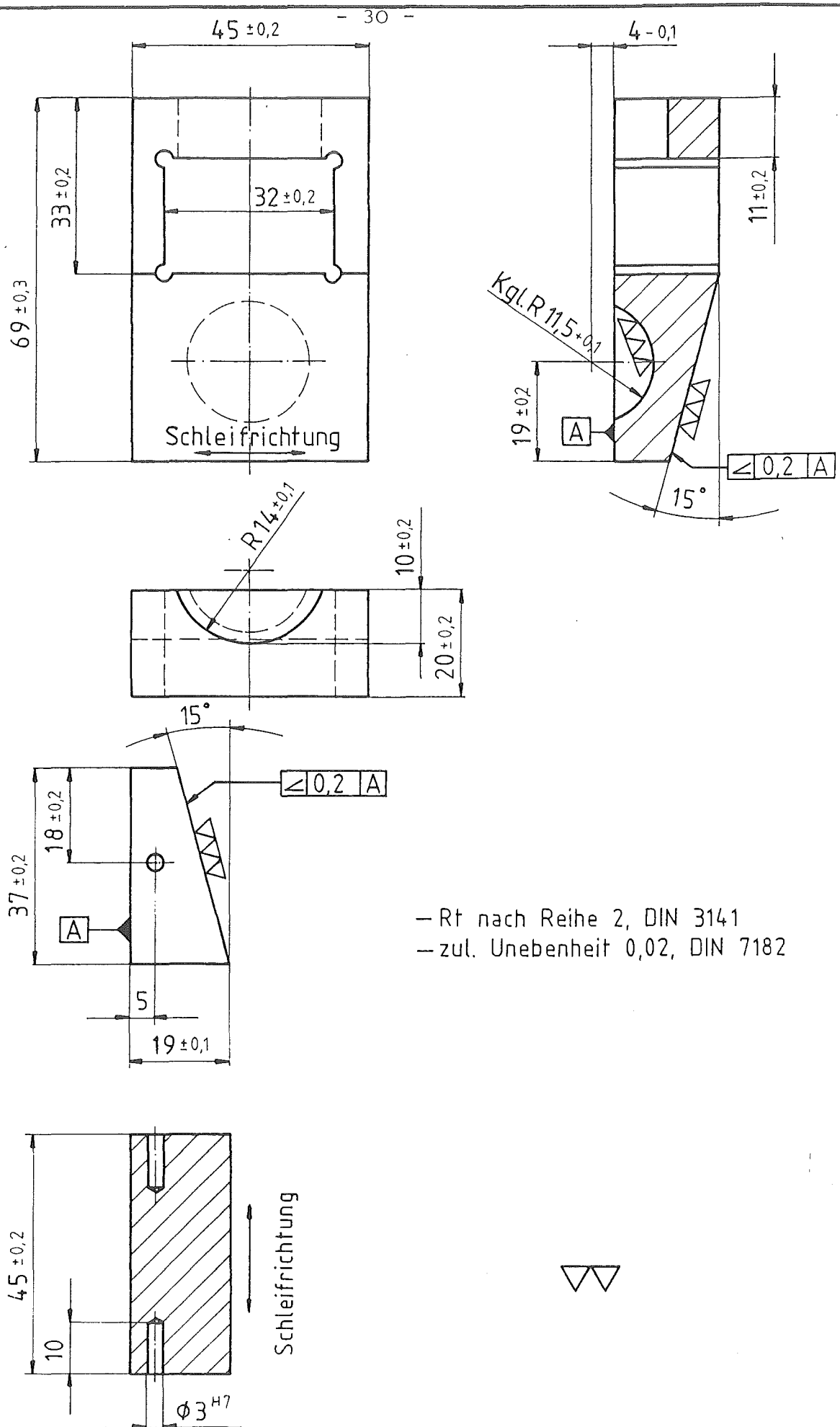


Bild 12: Keil und Kalottenstück

In Abständen von einigen tausend Wechselspielen erfolgt die Registrierung der Dehnwerte. Für die vorhandene Halbbrückenschaltung mit 2 DMS aktiv entsprechen hierbei 1000  $\mu\text{m/m}$  Dehnung gleich 1 MV/V Brückenausgangsspannung. Die Anordnung der DMS ist in Bild 13 dargestellt.

Die mittlere Flächenpressung (p) beträgt je nach Reibpaarung maximal 1550 N/cm<sup>2</sup>. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 1.

$$p = \frac{FN}{2 \cdot A} \quad [\text{N/cm}^2] \quad \text{mit} \quad (1)$$

$$FN = \frac{FE \cdot \cos \rho}{\sin (\alpha + \rho)} \quad (2)$$

Hierbei sind konstant:

FE = Eintreibkraft [N]

$\alpha$  = halber Öffnungswinkel

A = Reibfläche der Keile [cm<sup>2</sup>]

Die Ermittlung der Reibungszahlen  $\mu$  erfolgt nach folgenden Gleichungen:

$$M = V \cdot e - W (z - x) - H \cdot y \quad (3)$$

$$H = V \cdot \frac{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \mu}{\operatorname{tg} \alpha + \mu} \quad (4)$$

$$x = x_1 + b \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

$$y = y_1 - b \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

$$b = a \cdot \operatorname{tg} \alpha = a \cdot \mu \quad (7)$$

$$M = \frac{\epsilon \cdot E \cdot J}{e_1} \quad (8)$$

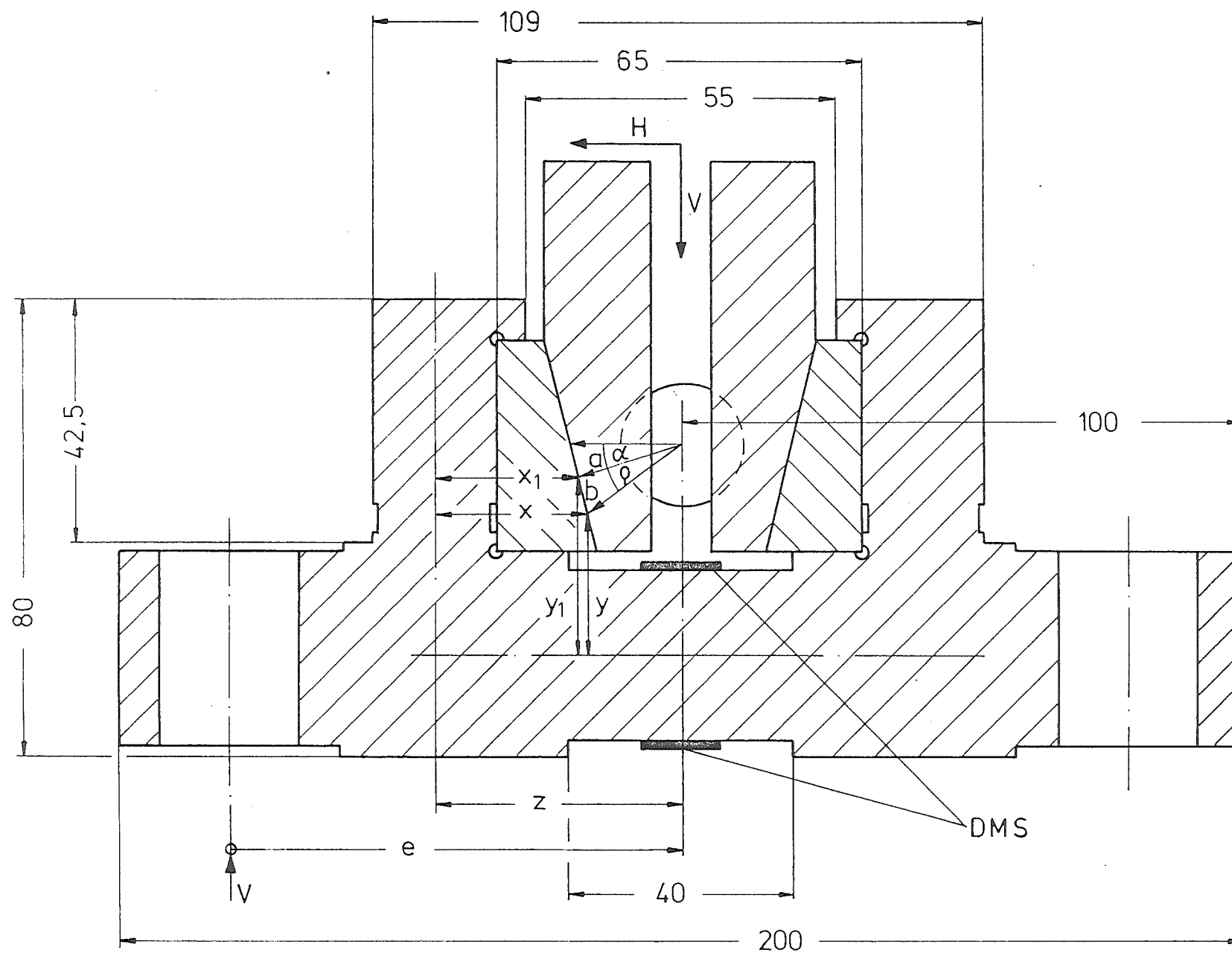


Bild 13

Lageskizze eines Keilpaares in der unteren Endstellung



Nach Einsetzen der Gleichungen 4 bis 7 in Gleichung 3 ergibt sich die Reibungszahl  $\mu$  zu

(9)

$$\mu = \frac{\frac{M}{V} \cdot \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha (e - z + x_1) + y_1}{\operatorname{tg} \alpha \cdot a \cdot \sin \alpha + (e - z + x_1 + a) \cdot \cos \alpha + \operatorname{tg} \alpha \cdot y_1 - \frac{M}{V}}$$

Nach Versuchsende werden die Keile demontiert und wie folgt untersucht:

- Die Reibflächen der Keile werden fotografiert.
- Die Rauigkeit der Reibflächen im Verschleißbereich werden gemessen.
- Auf den Reibflächen wird die Mikrohärte gemessen und zwar:
  1. im unbeschädigten Bereich,
  2. im Bereich mit Oberflächenverschleiß.
- Aus den Keilen werden Schliffe präpariert, die den Zustand der Gleitflächen und eventuell metallurgische Veränderungen zeigen.

In Tabelle 2 sind die Betriebsbedingungen und Belastungen der Keilpaare zusammengestellt.

Tabelle 2:

- Mittlere Flächenpressung je nach Reibpaarung	$p_F = \max. 1550 \text{ N/cm}^2$
- Reibung	$S_R = 1 - 2 \text{ mm}$
- Reibgeschwindigkeit	$V_R = 2 \text{ mm/sec}$
- Angestrebte Lebensdauer	$Z = 75 \cdot 10^3 \text{ Wechselbelastungen}$
- Temperatur	$T = R_t \text{ ca. } 25^\circ\text{C}$
- Versuche im Vakuum	$5 \cdot 10^{-7} \text{ bis } 5 \cdot 10^{-8} \text{ mbar}$

- Versuche in PNP-Gas  
(2 bar abs.)

Helium mit  
5  $\mu$ bar  $N_2$   
500  $\mu$ bar  $H_2$   
15  $\mu$ bar CO  
20  $\mu$ bar  $CH_4$   
1,5  $\mu$ bar  $H_2O$   
teilweise mit erhöhtem  
Feuchtegehalt

In den Tabellen 3 und 4 sind die Werkstoffkombinationen aufgelistet, mit denen die Untersuchungen durchgeführt werden.

Tabelle 3:

Aufstellung der untersuchten Werkstoffpaarungen in PNP-Gas

Versuch Nr.	Werkstoff der Reibflächen		Grundwerkstoff
	innere Keile (a)	äußere Keile (b)	
1	Stellite 6(St6)	/ Stellite 6(St6)	St37-2
2	Stellite 20(St20)	/ Stellite 20(St20)	"
3	PW 60K	/ PW 60 K	"
4	Defler B (DB)	/ Defler B (DB)	"
5	Tribaloy 700(T700)/	Tribaloy 700(T700)	"
6	Tribaloy 800(T800)/	Tribaloy 800(T800)	"
7	TH	/ TH	"
8	Titankarbid(TiC)	/ Titankarbid(TiC)	X210CrW12 (W.Nr.1.2436)
9	Titannitrid(TiN)	/ Titannitrid(TiN)	X20Cr13 (W.Nr.1.4021)
10	Chromkarbid(CrC)	/ Chromkarbid(CrC)	X210CrW12

Fortsetzung Tab. 3:

Versuch Nr.	Werkstoff der Reibflächen		Grundwerkstoff
	innere Keile (a)	äußere Keile (b)	
11	Molybkombin 316(Mb316)/	Stellite 6(St6)	St37-2
12	321R-Gleitlack(321)	/ Stellite 6(St6)	"
13	Molybkomin 316(Mb316)	/ Delfer B(DB)	"
14	Titankarbid(TiC)/Molybkombin 316(Mb316)		X210CrW12/St37-2
15	Titannitrid(TiN)/Molybkombin 316(Mb316)		X20Cr13/St37-2
16	Chromkarbid(CrC)/Molybkombin 316(Mb316)		X210CrW12/St37-2
17	Tfe-Lok (Tf)	/ Stellite 6(St6)	St37-2
18	Tfe-Lok (Tf)	/ Titankarbid(TiC)	St37-2/X210CrW12
19	Tfe-Lok (Tf)	/ Tfe-Lok (Tf)	St37-2

Tabelle 4:

Aufstellung der untersuchten Werkstoffpaarungen im Vakuum

Versuch Nr.	Werkstoff der Reibflächen		Grundwerkstoff
	innere Keile (a)	äußere Keile (b)	
20	Stellite 6(St6)	/ Stellite 6(St6)	St37-2
21	Stellite 20(St20)	/ Stellite 20(St20)	"
22	PW 60K	/ PW 60K	"
23	Defler B(DB)	/ Defler B(DB)	"
24	Titankarbid(TiC)	/ Tidankarbid(TiC)	X100CrMoV51 (W.Nr.1.2363)
25	Defler B (DB)	/ Molybkombin 316(Mb316)	St37-2
26	Molybkombin 316(Mb316)/Stellite 6(St6)		"
27	Stellite 6(St6)	/ Tfe-Lok (Tf)	"

Einige spezifische Daten der gewählten Deloro-Legierungen sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5:

Legierung	Richtanalyse										Härte Rc	Auftrags- verfahren
	Co	Cr	W	C	Mo	Ni	Fe	Si	B			
Kobalt-Basis:												
Stellite 6	66	26	5	1							39-43	A
Stellite 20	45	33	18	2,5							55-59	A
Nickel-Basis:												
PW 60K		16		0,7		Rest	4	4	4		59-62	P
Eisen-Basis:												
Delfer B	6	18		3,2		16	Rest	$\frac{V}{2}$			53-65	A
Intermetallische												
Verbindungen:	+Fe											
Tribaloy 700	3,0	15,5		0,08	32,5	Rest		3,4			42-48	A
						+Fe						
Tribaloy 800	Rest	17,5		0,08	28,5	3,0		3,4			54-62	A
Legierung der												
Technischen												
Hochschule,		30	9	1,3		Rest	3	2,2	1		42	PS
Aachen												

A = Autogenes Auftragsschweißen

P = Pulver-Schweißen

PS = Plasma-Spritzen

#### Keramische Harstoffüberzüge

Das Aufbringen der Hartstoffüberzüge (Titankarbid, TiC; Titanitrid, TiN; Chromkarbid, CrC) erfolgt nach dem CVD-(Chemical Vapor Deposition)Verfahren. Die Überzüge werden hierbei auf zu beschichtenden Teile unter verminderten Druck bei etwa 900°C bis

1050°C abgeschieden. Die Werkstücke werden im Vakuumofen von genau aufeinander abgestimmten Gasgemischen bei Reaktionstemperatur umspült, wobei die Hartstoffüberzüge sehr gleichmäßig und außerordentlich festhaftend auf die Trägerwerkstoffe aufwachsen. In Anschluß an die Beschichtung werden die Werkstücke aus vergütbaren Stählen - zwecks Erhöhung der Stützwirkung für die Hartstoffüberzüge - im Reaktor abgehärtet und anschließend auf die gewünschte Arbeitshärte angelassen.

In Tabelle 6 sind einige Katalog-Daten über CVD-Hartstoffüberzüge zusammengestellt und die verwendeten Trägerwerkstoffe für die CVD-beschichteten Keile aufgeführt.

Tabelle 6:

CVD-Hartstoff	Trägerwerkstoff W.Nr.	Hartstoff-Schichtdicke ( $\mu\text{m}$ )	Härte HV 0,05 ( $10^3 \text{ N/mm}^2$ )	E-Modul ( $10^3 \text{ N/mm}^2$ )
Titankarbid (TiC)	1.2436	$8 \pm 2$	34 - 52	458
Titannitrid (TiN)	1.4021	$10 \pm 3$	18 - 28	256
Chromkarbid (CrC)	1.2436	$10 \pm 3$	22 - 24	-

### Gleitlacke

Gleitlacke stellen Lacke dar, bei denen anstelle der üblichen Farb- oder Metallpigmente Festschmierstoff-Pulver vorhanden sind.

Man unterscheidet je nach Bindemittel zwischen organischen und anorganischen Gleitlacken. Ein wesentlicher Vorteil der Gleitlacke ist, daß sie im Vergleich zu den Festschmierstoff-Pulverfilmen

einen viel größeren Schmierstoffvorrat an den Oberflächen verankern und damit die Lebensdauer der Trockenschmierfilms bedeutend verlängern.

Die beiden verwendeten Gleitlacke (Molybkombin 316 und 321R) sind anorganischer Zusammensetzung mit einer Festschmierstoffkombination von Molybdändisulfid  $\text{MoS}_2$ ) und Graphit.

Anorganische Gleitlacke enthalten als Bindemittel Salze. Der Vorteil dieser Lacke ist, daß sie thermisch höher als die organischen Gleitlacke belastbar sind. Darüber hinaus sind sie meist strahlungsstabil. Ihr Nachteil ist jedoch, daß sie einen wesentlich geringeren Korrosionsschutz als organische Gleitlacke besitzen.

In Tabelle 7 sind einige Angaben über die Gleitlackbeschichtung zusammengestellt:

Tabelle 7:

	Molybkombin 316	321R Gleitlack
Trägerwerkstoff	St37-2	St37-2
Vorbehandlung der Oberfläche	geschliffen, entfettet	geschliffen, entfettet
Schichtdicke	7 - 10 $\mu\text{m}$	7 - 15 $\mu\text{m}$
Trockenzeit	ca. 30 min bei 20°C	ca. 1 min bei 20°C
Reibungskoeffizient nach Herstellerangaben, in Luft	0,04 - 0,1	mit zunehmender Belastung fallend auf 0,04
Preß-Fit-Test Reibwert	0,09 kein Rückgleiten	0,06 kein Rückgleiten
Temperatur-Einsatzbereich	max. 300°C	-180°C bis +450°C in Luft bis 650°C bei Luftabschluß

### Tfe-Lok Beschichtung

(Hartverchromen + PTFE-Einlagerung)

Das Tfelok-Verfahren zeichnet sich dadurch besonders aus, daß PTFE in vorbehandelte Oberflächen - hier Hartchrom - eingelagert wird. Die Werkstückoberfläche wird dazu nach üblichen Verfahren mit einer Hartchromschicht von 50 µm belegt und anschließend poliert. Nach einem besonderen Verfahren werden rund 15.000 Öffnungen und Risse je cm<sup>2</sup> in den Hartchrom geätzt. Das Werkstück wird nun auf Temperaturen zwischen 150 und 200°C erwärmt, um die Risse und Öffnungen thermisch zu erweitern. PTFE in feinstpulverisierter Form wird auf - 70°C unterkühlt und auf die erwärmte Hartchromoberfläche gebracht. Die PTFE-Partikel lagern sich in der porösen Oberfläche ab, absorbieren die Wärme, expandieren und werden fest in der Chromschicht eingeschlossen.

## 6. Testergebnisse

### 6.1 Werkstoffpaarungen in HTR-Atmosphäre

Zu jeder Werkstoffpaarung gibt es

- 1) Diagramme, in denen die Reibwerte, z.T. der Gasdruck im Rezipienten und der Feuchtegehalt des Gases als Funktion der aufsummierten Wechselbelastungen dargestellt sind,
- 2) Fotos aller Keilstücke, die nach Versuchsende aufgenommen worden sind und dazu eine visuelle Oberflächenbeurteilung auf Verschleiß,
- 3) Schliffbilder und lichtmikroskopische Betrachtung von Oberflächeneffekten,
- 4) Zahlenmaterial, bestehend aus Härtewerten der Gleitpartner, Reibzahlen (Mittel-, Größt- und Kleinstwerte), aus den Messungen der Oberflächenrauigkeit und aus den Analysen der Gasqualität.

Die Mikrofotos des Punktes 3) können nicht den gesamten Schichtverlauf zeigen, darum sind charakteristische Stellen aufgenommen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß dünne Schichten - kleiner  $1\ \mu$  - bei der Schleif- und Polierprozedur auf einzelne Proben aufgerieben wurden. Diese sind lichtmikroskopisch nicht mehr nachweisbar (Auflösungsgrenze).

Die Proben wurden an den geschädigten Stellen der Keilstücke  $90^\circ$  zur Keilaußenfläche entnommen (Querschliffe).



Die Mikrohärtemessung wurde mit unterschiedlichen Lastbereichen (HV 0,1; HV 0,5; HV 1) durchgeführt. Die Lastbereiche richten sich jeweils nach der Probenoberfläche, deren Beschaffenheit und deren Härte. Die aufgeführten Härtewerte beruhen grundsätzlich auf Mittelwerte von mindestens 5 Härteeindrücken.

Wegen der starken Oberflächenrauigkeit an den geschädigten Stellen und den durch Abtrag unregelmäßig dicken Schichtaufbau war die Härtemessung in einigen Fällen nur schwer oder garnicht durchführbar. In der Auflistung der Ergebnisse sind derartige Ausnahmefälle genau ersichtlich.

## 6.2 Werkstoffpaarung in Vakuum

Zu jeder Werkstoffpaarung gibt es

- 1) Diagramme, in denen die Reibwerte und Flächenpressung als Funktion der aufsummierten Wechselbelastungen dargestellt sind,
- 2) Fotos aller Keilstücke, die nach Versuchsende aufgenommen worden sind und eine visuelle Oberflächenbeurteilung auf Verschleiß.

## 6.3 Zusammenfassende und vergleichende Ergebnisse

Das Reibverhalten der unter Punkt 6.1, 1) und 6.2, 1) aufgeführten und dargestellten Paarungen ist nach verschiedenen Kriterien, wie

- Größe des Oberflächenverschleißes
- Werkstoffkombinationen (Stellite gegeneinander, keramische Hartstoffüberzüge gegeneinander, Gleitlack als Reibpartner, Tfelok als Partner)
- HTR-Gas zu Vakuum

in Diagrammen zusammengefaßt bzw. gegenübergestellt.

Die Gasqualität ist in regelmäßigen Abständen im Gaschromatographen analysiert worden. In Tab. 8 sind einige Analysenergebnisse aufgeführt.

Tabelle 8:

		<u>Analysenergebnisse</u>							
	Sollwert	1	2	3	4	5	6	7	8
H <sub>2</sub> /μbar	500	449	462	529	441	438	534	488	427
N <sub>2</sub> / "	5	9	11	14	7	17	14	11	8
CH <sub>4</sub> / "	20	16	11	22	14	21	19	17	20
CO/ "	15	12	9	16	13	18	17	10	14
O <sub>2</sub> / "	0	2	1	3	1	1	2	1	1

Die Gasfeuchte ist kontinuierlich gemessen worden. Abgesehen von einigen Spitzenwerten, die von kurzzeitigen Ausfällen der Stickstoffversorgung herrühren, liegt der Wassergehalt bei ca. 5 μbar. In einigen Diagrammen ist der Einfluß der Feuchte auf das Reibverhalten dargestellt.

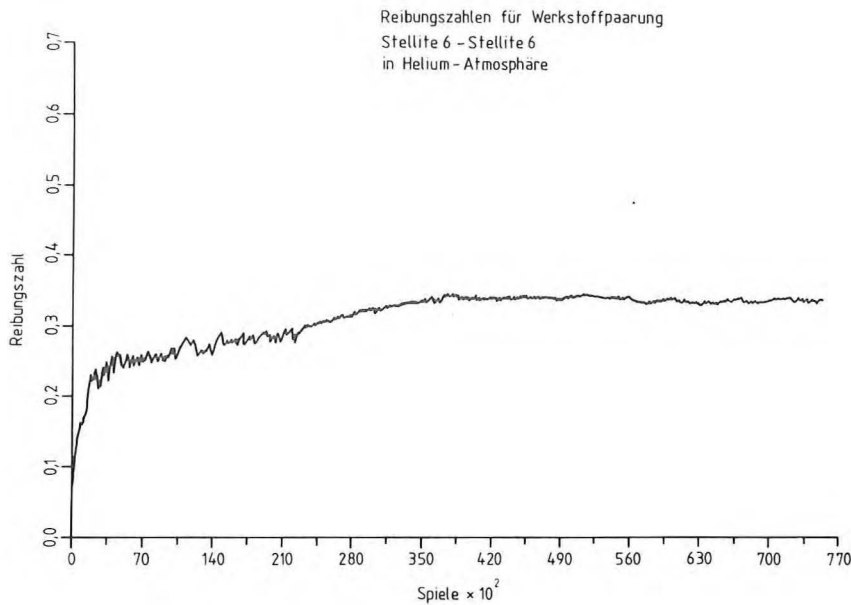
Tabelle 9:

Visuelle Oberflächenbeurteilung auf Verschleiß

Paarung	Untersuchung in Helium-Atmosphäre	
	Innerer Keil (a)	Äußerer Keil (b)
1 St6/St6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mittig schwacher Verschleiß</li> <li>- Aufrauungen</li> <li>- Randzonen eingelätet</li> </ul>	wie a
2 St20/ St20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mittig starker Verschleiß</li> <li>- Aufrauungen</li> <li>- teilweise Gröbchenbildung, Ausbröckelung</li> <li>- Randzonen mit flächigem mittelstarkem Verschleiß</li> </ul>	Verschleißhügel  wie a
3 PW60K/ PW60K	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mittig Aufrauungen mit feinen Riefen</li> <li>- Randzonen eingelätet</li> </ul>	wie a
4 DB/DB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- großflächiger Verschleiß</li> <li>- Aufrauungen, teilweise wellige Kuppen und feine Ausbröckelungen</li> </ul>	wie a
5 T700/ T700	<ul style="list-style-type: none"> <li>- großflächiger starker Verschleiß</li> <li>- Aufrauungen, mittig wellige Kuppen</li> </ul>	wie a
6 T800/ T800	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mittig großflächiger Verschleiß</li> <li>- Ausbröckelungen und Riefen</li> </ul>	wie a
7 TH/TH	<ul style="list-style-type: none"> <li>- großflächiger starker Verschleiß</li> <li>- Überwiegend tiefe Riefen</li> </ul>	wie a
8 TiC/TiC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TiC-Schicht in den Randzonen lokal zerstört, feine Riefen</li> <li>- übrige Oberfläche teilweise eingelätet, kein Fressen</li> </ul>	wie a

9 TiN/TiN	<ul style="list-style-type: none"> <li>- großflächige Zerstörung der TiN-Schicht,</li> <li>- Grübchenbildung, Ausbröckelungen, wo die TiN-Schicht zerstört ist</li> </ul>	wie a
10 CrC/CrC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CrC-Schicht in den Randzonen teilweise abgetragen</li> <li>- kein Fressen</li> </ul>	wie a
11 Mb316/ St6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- an den Ecken leichtes Fressen</li> <li>- sonst geringer Gleitlackabrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gleitlackübertrag überwiegend in der Mitte</li> <li>- Oberfläche glatt mit Aufrauungen an den Ecken</li> </ul>
12 321R/ St6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufrauungen mit Riefen an wenigen Stellen</li> <li>- Gleitlack großflächig bis auf dünne Schicht abgetragen</li> </ul>	<p>wie a</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gleitlack ungleichmäßig übertragen</li> </ul>
13 Mb316/ DB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ungleichmäßig starker Abrieb der Gleitlackschicht</li> <li>- feine Riefen, wo Gleitlack abgetragen ist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gleitlackübertragung auf der gesamten Fläche</li> <li>- glatte Oberfläche mit feinen Riefen</li> </ul>
14 TiC/ Mb316	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TiC-Schicht teilweise zerstört</li> <li>- leichtes Fressen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ungleichmäßiger Abrieb der Gleitlack-Schicht</li> <li>- lokale Grübchenbildung, Ausbröckelungen, wo Gleitlack abgetragen ist</li> </ul>
15 TiN/ Mb316	<ul style="list-style-type: none"> <li>- großflächige Zerstörung der TiN-Schicht, wellige Erhöhungen und Vertiefungen mit kleinen Ausbröckelungen</li> <li>- ungleichmäßige Gleitlackübertragungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokal starker Verschleiß, wellige Erhöhungen und Vertiefungen mit Ausbröckelungen</li> <li>- starker Gleitlackabrieb</li> </ul>
16 CrC/ Mb316	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ungleichmäßiger Gleitlackübertrag</li> <li>- mittig und an den Ecken Aufrauungen, kein Fressen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gleitlack ungleichmäßig übertragen</li> <li>- lokale Aufrauungen</li> </ul>
17 Tf/St6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tfelok-Schicht in den Randzonen zerstört, Aufrauungen mit Riefen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PTFE-Übertrag in den Randzonen, feine Riefen</li> <li>- sonst glatte Oberfläche</li> </ul>

18 Tf/TiC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tfelok-Schicht stark zerstört</li> <li>- Grübchenbildung, Ausbröckelungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TiC-Schicht stark zerstört</li> <li>- Aufrauungen mit lokalen Ausbröckelungen</li> </ul>
19 Tf/Tf	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Randzonen zerstört</li> <li>- Aufrauungen, teilweise Kuppen</li> </ul>	wie a
Untersuchungen im Vakuum		
20 St6/St6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokaler Verschleiß</li> <li>- Grübchenbildung</li> <li>- Ausbröckelungen</li> </ul>	wie a
21 St20/ St20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokaler Verschleiß</li> <li>- Grübchenbildung</li> <li>- Ausbröckelungen</li> </ul>	wie a
22 PW60K/ PW60/K	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokaler Verschleiß</li> <li>- Grübchenbildung</li> <li>- Ausbröckelungen</li> </ul>	wie a
23 DB/DB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- leicher lokaler Verschleiß</li> </ul>	wie a
24 TiC/TiC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TiC-Schicht großflächig zerstört</li> </ul>	wie a
25 DB/Mb316	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gleitlackübertragung</li> <li>- glatte Oberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Druckstellen und leichte Riefen</li> <li>- ungleichmäßiger Abrieb des Gleitlackes</li> </ul>
26 Mb316/ St6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ungleichmäßiger Abrieb der Gleitlackschicht</li> <li>- Riefen, wo Gleitlack abgerieben ist</li> <li>- 1 lokale Verschleißstelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gleitlackübertrag</li> <li>- 1 lokale Verschleißstelle</li> <li>- übrige Oberfläche glatt</li> </ul>
27 St6/Tf	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokale Verschleißstellen</li> <li>- Grübchenbildung, Ausbröckelungen</li> <li>- geringer Materialübertrag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokale Verschleißstellen wo Tfelok-Schicht abgerieben ist</li> <li>- Beginn von Grübchenbildung, Ausbröckelungen</li> </ul>



Paarung  
Nr.1

Stellite 6  
gegen  
Stellite 6

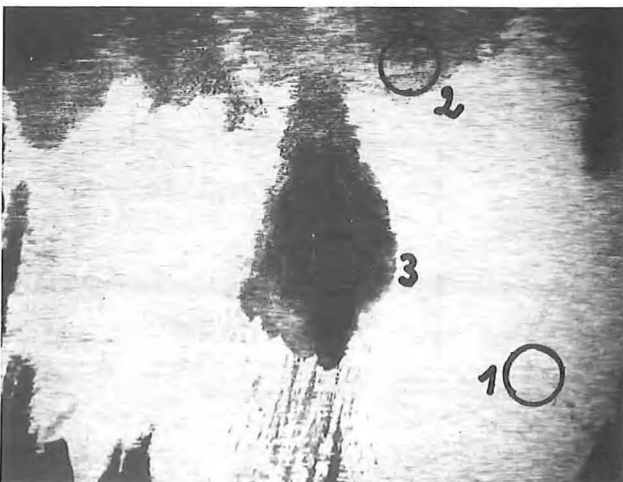
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,31	0,37	0,04	
Temperatur	22,0	25,2	19,8	°C
Feuchte	5,7	23,3	0,0	µbar



1 a

- 1) 580 HV 0,5
- 2) von 360 HV 0,5  
bis 530 HV 0,5
- 3) von 140 HV 0,5  
bis 280 HV 0,5

- Unbeschädigte Oberfläche:  
Mittenrauhwert  $R_S = 0,3 \mu\text{m}$   
max. Wellentiefe  $W_t = 3,0 \mu\text{m}$
- Oberfläche im Verschleiß-  
bereich:  
Mittenrauhwert  $R_{SV} = 1,5 \mu\text{m}$   
max. Wellentiefe  $W_{tv} = 18,2 \mu\text{m}$

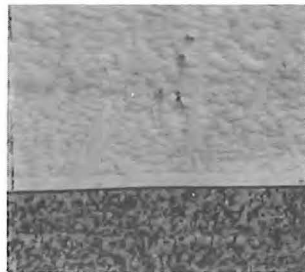


1 b

- 1) 580 HV 0,5
- 2) von 340 HV 0,5  
bis 560 HV 0,5
- 3) von 130 HV 0,5  
bis 290 HV 0,5

- $R_S = 0,6 \mu\text{m}$
- $W_t = 7,0 \mu\text{m}$
- $R_{SV} = 1,2 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 11,7 \mu\text{m}$

### Innerer Keil (1 a)



Stellite 6

Grund-  
werkstoff  
St37-2

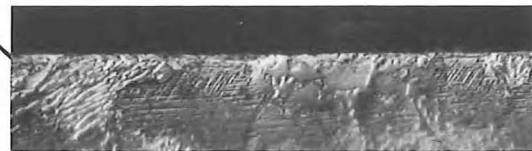
Glatte Oberfläche mit geringem Abtrag an wenigen Stellen. Nach Ätzung sind in den oberflächen-  
nahen Körner Gleitriefen nachweis-  
bar. In der Stellite 6-Schicht  
sind kleinere Poren bzw. Ein-  
schlüsse zu erkennen.

(50 : 1)



(500 : 1)

Reibflächen Stellite 6



(500 : 1)

### Äußerer Keil (1 b)

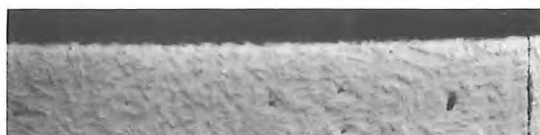


Stellite 6

St37-2

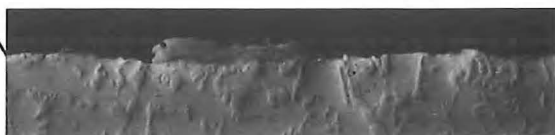
An einigen Stellen ist eine  
2. Schicht auf der Primärschicht  
nachweisbar. Wahrscheinlich han-  
delt es sich dabei um abgetragenes  
und neu aufplattiertes Matrixmaterial.

(50 : 1)

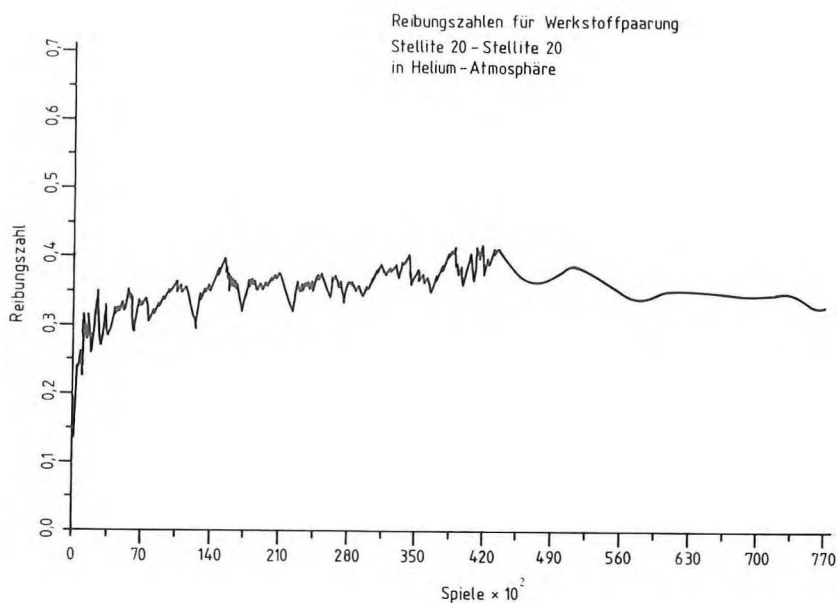


(50 : 1)

Reibflächen Stellite 6

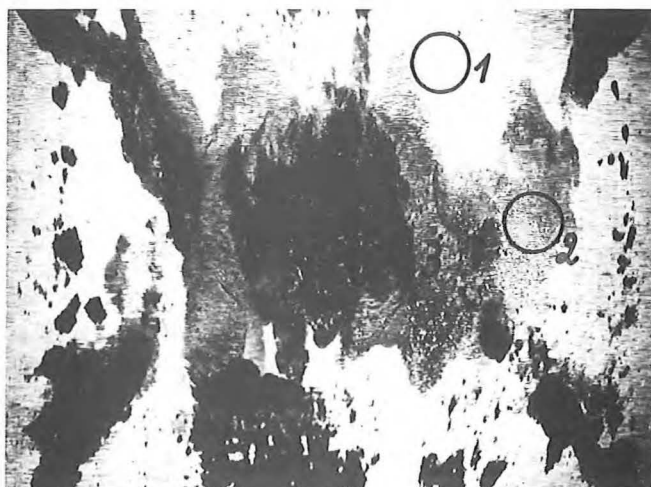


(200 : 1)



Paarung  
Nr. 2

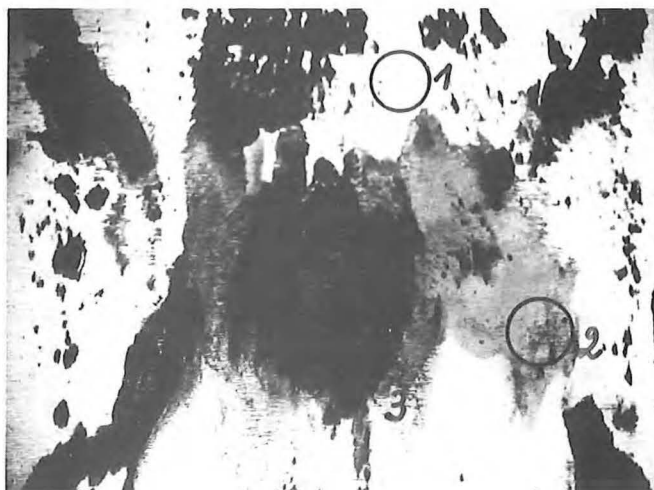
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,35	0,43	0,08	
Druck	2,0	2,08	0,003	bar
Feuchte	7,4	25,2	1,5	μbar



2 a

- 1) 670 HV 0,5
- 2) von 420 HV 0,5  
bis 800 HV 0,5
- 3) von 140 HV 0,5  
bis 810 HV 0,5

- $R_s = 0,3 \mu m$
- $W_t = 3,1 \mu m$
- $R_{sv} = 9,6 \mu m$
- $W_{tv} = 14,6 \mu m$



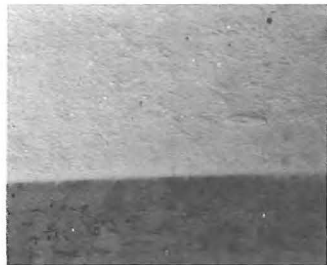
2 b

- 1) 780 HV 0,5
- 2) 900 HV 0,5
- 3) von 320 HV 0,5  
bis 680 HV 0,5

- $R_s = 0,4 \mu m$
- $W_t = 6,8 \mu m$
- $R_{sv} = 6,3 \mu m$
- $W_{tv} = 86,6 \mu m$



2 a



Stellite 20

St37-2

(50 : 1)



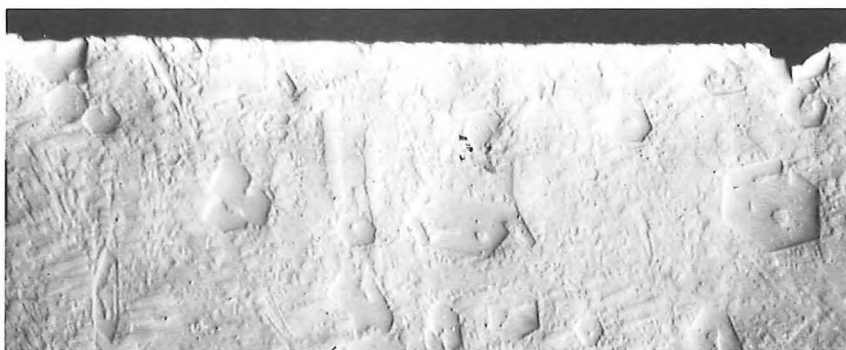
(100 : 1)

An einer Stelle ist die Stellite 20-Schicht bis zum Grundwerkstoff gerissen. Oberfläche leicht aufgeraut.



(200 : 1)

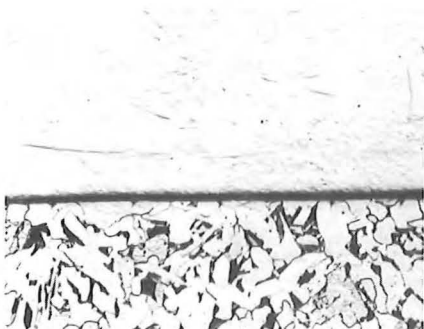
2 b



Reibfläche

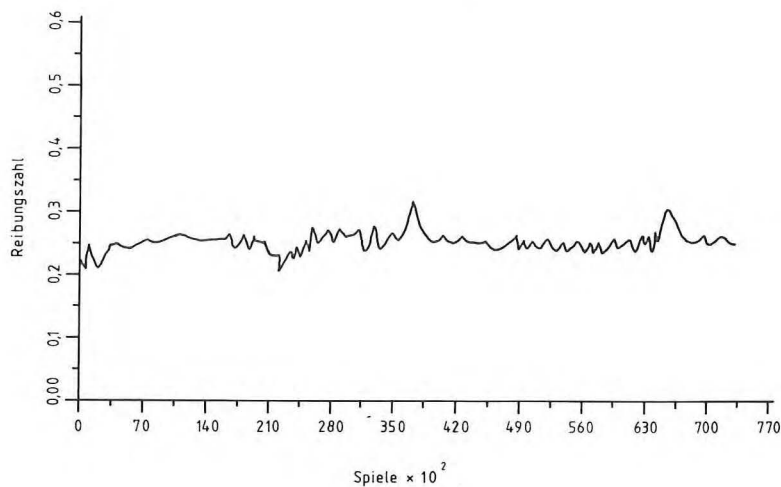
(500 : 1)

Bis auf einige ausgebrochene Karbide ist die Oberfläche glatt.



(50 : 1)

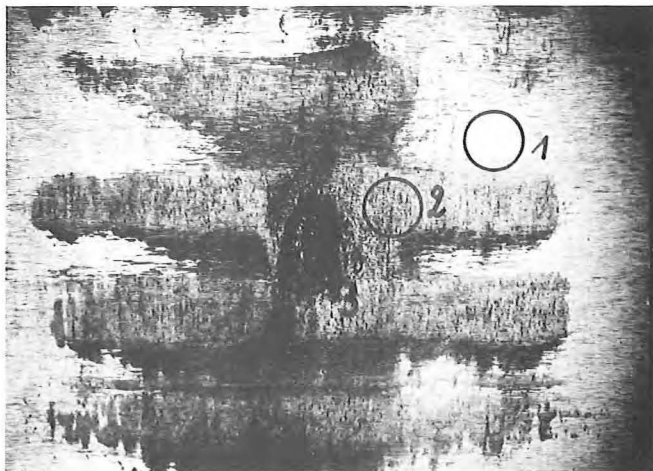
Reibungszahl für Werkstoffpaarung  
PW 60K - PW 60K  
in Helium - Atmosphäre



Paarung  
Nr. 3

Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,25	0,33	0,2	
Temperatur	23,9	28,9	20,2	°C
Feuchte	5,4	36,6	8,8	μbar

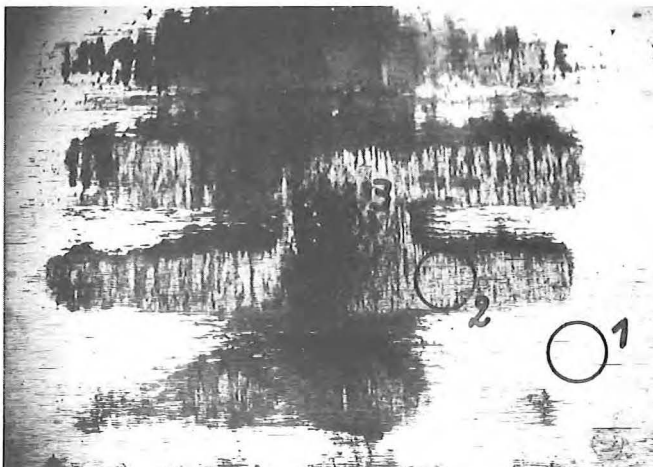
3 a



- 1) 510 HV 0,5
- 2) 630 HV 0,5
- 3) von 150 HV 0,5  
bis 570 HV 0,5

- $R_s = 0,3 \mu\text{m}$
- $W_t = 6,0 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 1,2 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 22,8 \mu\text{m}$

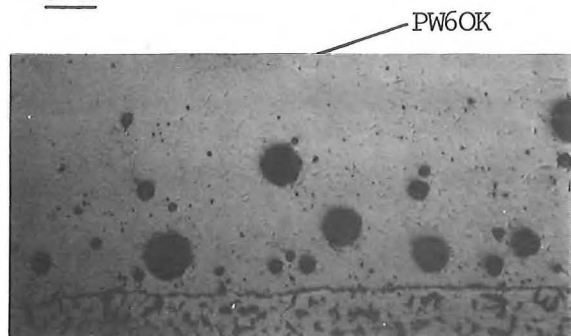
3 b



- 1) 910 HV 0,5
- 2) von 720 HV 0,5  
bis 930 HV 0,5
- 3) von 170 HV 0,5  
bis 910 HV 0,5

- $R_s = 0,2 \mu\text{m}$
- $W_t = 4,7 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 1,2 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 15,6 \mu\text{m}$

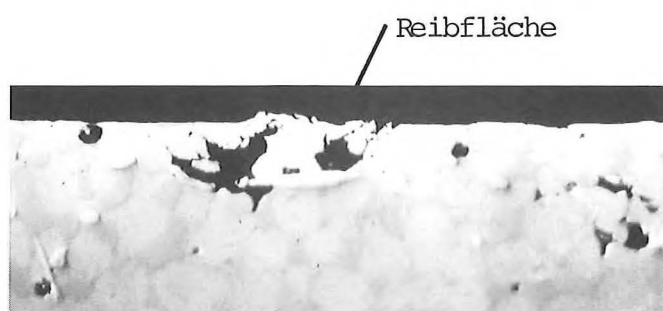
3 a



PW60K

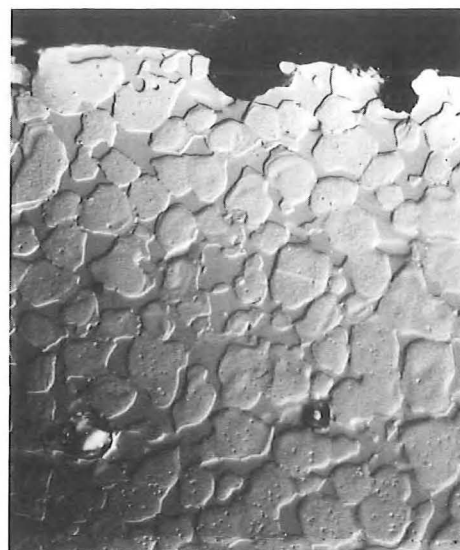
(50 : 1)

St37-2



Reibfläche

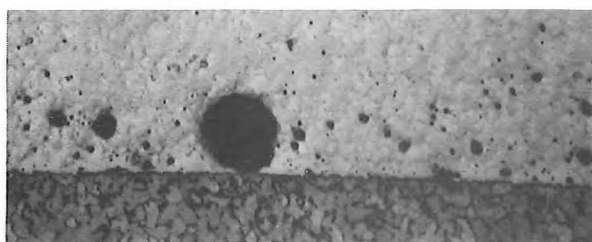
(500 : 1)



(500 : 1)

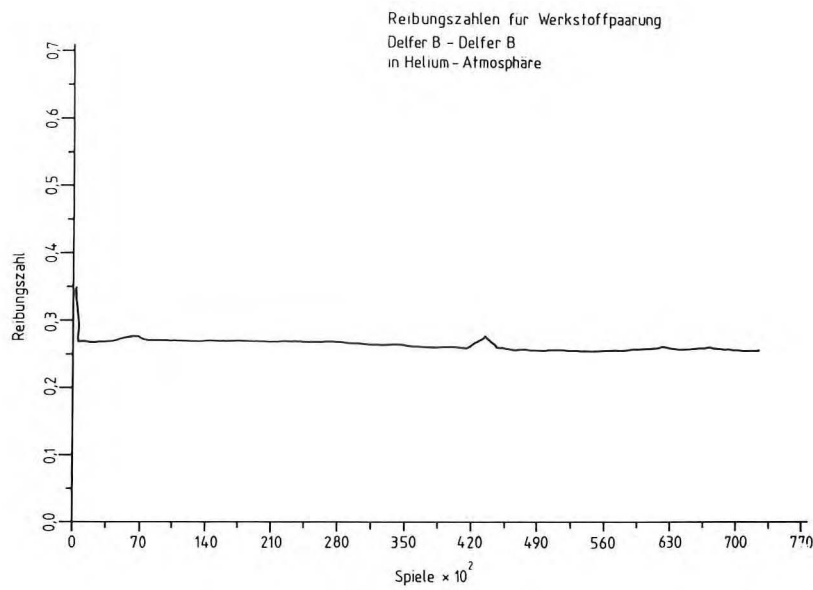
Gleichmäßige Oberfläche  
mit einigen Ausbrüchen.  
Poren oder 2. Werkstoff  
in der PW60K-Schicht.

3 b



Gleichmäßige PW60K-Schicht  
mit Poren bzw. Einschlüssen  
(auch 3 a).  
Rauhe Oberfläche mit feinen  
Ausbrüchen.





Paarung  
Nr. 4

Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,27	0,35	0,25	
Druck	2,1	2,28	0,002	bar



4 a

- 1) 890 HV 0,5
- 2) 990 HV 0,5

- $R_s = 0,3 \mu\text{m}$
- $W_t = 4,5 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 3,0 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 30,1 \mu\text{m}$

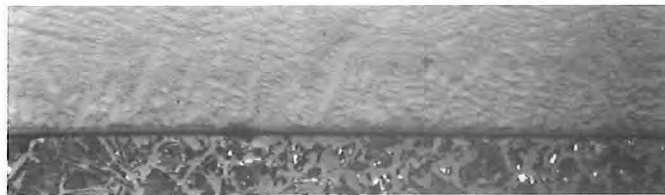


4 b

- 1) 870 HV 0,5
- 2) von 460 HV 0,5  
bis 860 HV 0,5

- $R_s = 0,2 \mu\text{m}$
- $W_t = 6,3 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 2,7 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 27,4 \mu\text{m}$

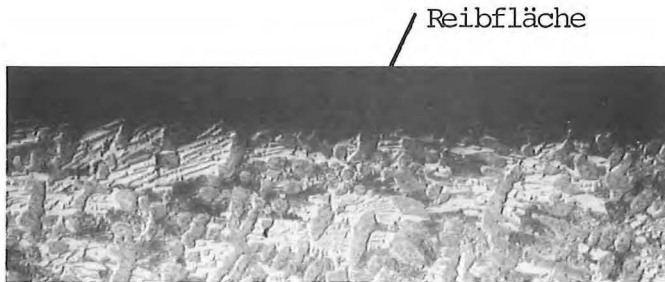
4 a



Delfer B

St37-2

(50 : 1)



Reibfläche

Gleichmäßige Delfer B-Schicht.  
Die Oberfläche ist leicht  
aufgerauht.

(200 : 1)

4 b

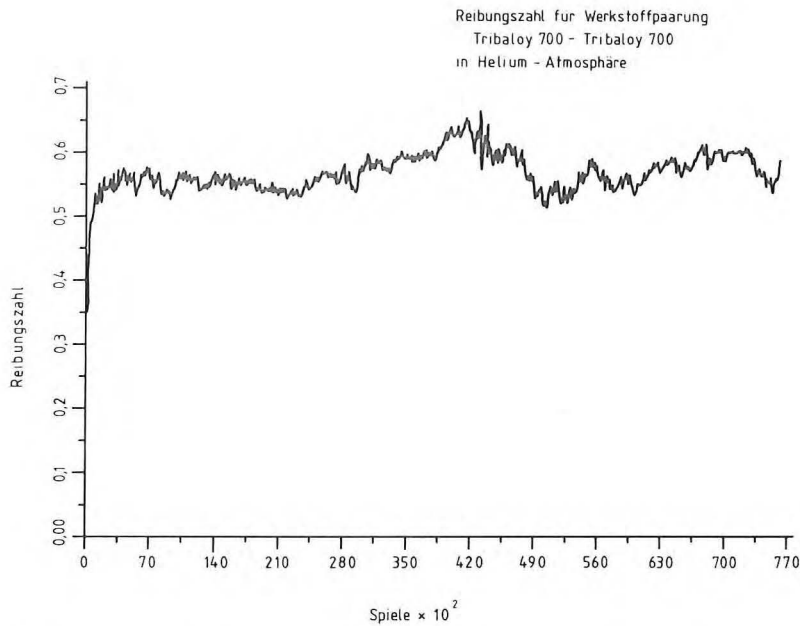


(50 : 1)



Oberfläche leicht aufgerauht.  
Vertiefungen und ungleich-  
mäßige Materailkuppen sind  
erkennbar.

(500 : 1)



Paarung  
Nr. 5

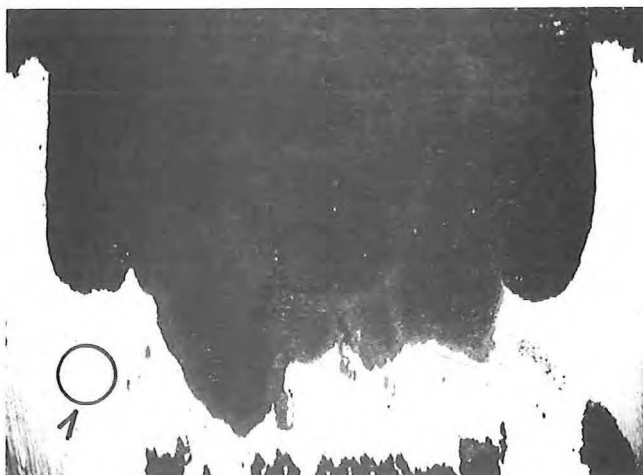
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,55	0,67	0,15	
Druck	2,0	2,18	1,71	bar



5 a

- 1) 480 HV 0,5
- 2) Wegen der starken Oberflächenrauigkeit Härtemessungen nicht möglich

- $R_s = 0,25 \mu\text{m}$
- $W_t = 4,6 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 16,5 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 120,9 \mu\text{m}$

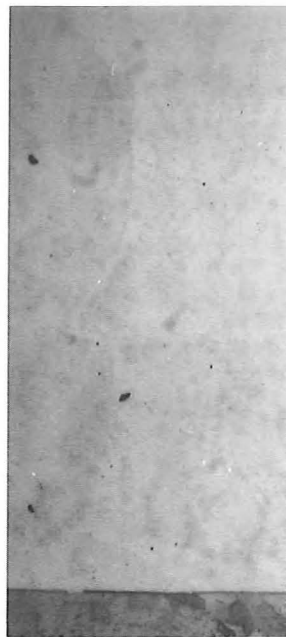


5 b

- 1) 525 HV 0,5
- 2) wie unter 5 a

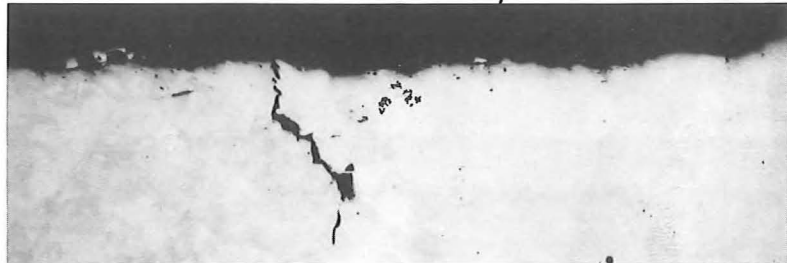
- $R_s = 0,15 \mu\text{m}$
- $W_t = 1,6 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 17,0 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 124,1 \mu\text{m}$

5 a



Tribaloy 700

Reibfläche



Oberfläche ist aufgerauht.  
An einigen Stellen sind kleine  
Risse nachweisbar

(50 : 1)

5 b

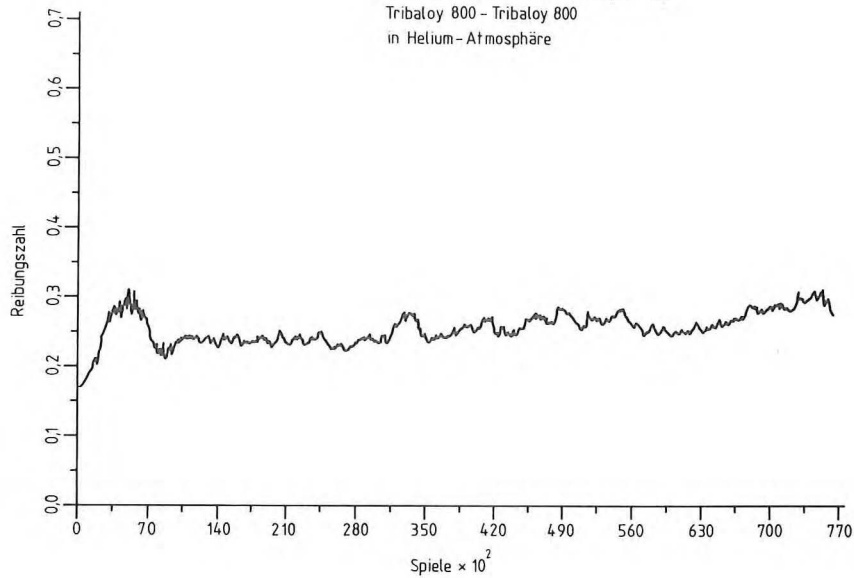


(50 : 1)

(200 : 1)

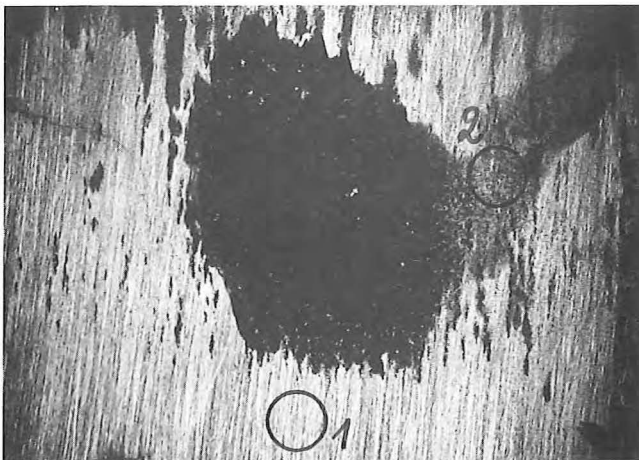
Oberfläche ist stark geschädigt. Stellenweise liegt eine zusätzliche  
Auftragsschicht vor. Poren bzw. 2. Werkstoff im Tribaloy 700 sind zu  
erkennen.

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
Tribaloy 800 - Tribaloy 800  
in Helium-Atmosphäre



Paarung  
Nr. 6

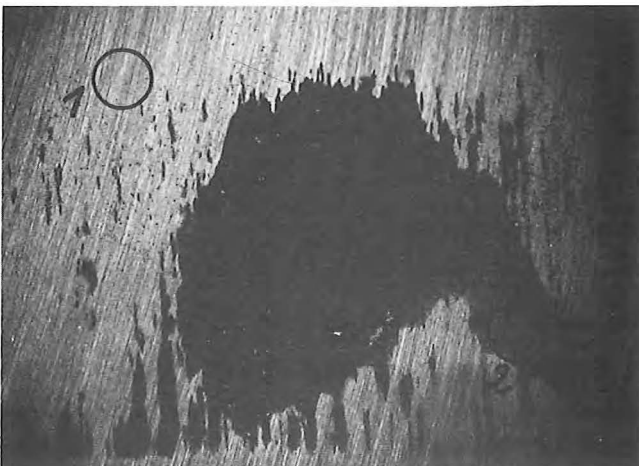
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,25	0,32	0,15	
Druck	1,8	2,1	0,62	bar



6 a

- 1) 710 HV 0,5
- 2) 770 HV 0,5
- 3) 800 HV 0,5

- $R_s = 0,2 \mu m$
- $W_t = 2,4 \mu m$
- $R_{sv} = 8,0 \mu m$
- $W_{tv} = 75,7 \mu m$



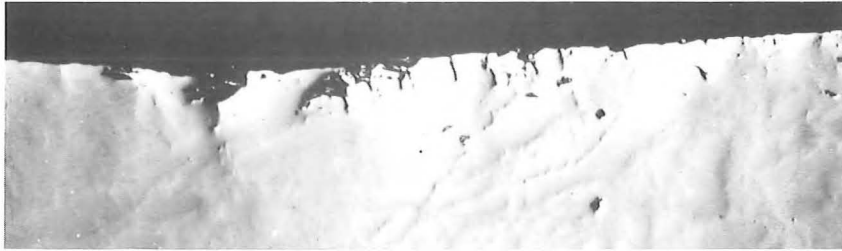
6 b

- 1) 830 HV 0,5
- 2) 770 HV 0,5
- 3) 705 HV 0,5

- $R_s = 0,3 \mu m$
- $W_t = 9,2 \mu m$
- $R_{sv} = 5,7 \mu m$
- $W_{tv} = 44,8 \mu m$



6 a



(200 : 1)

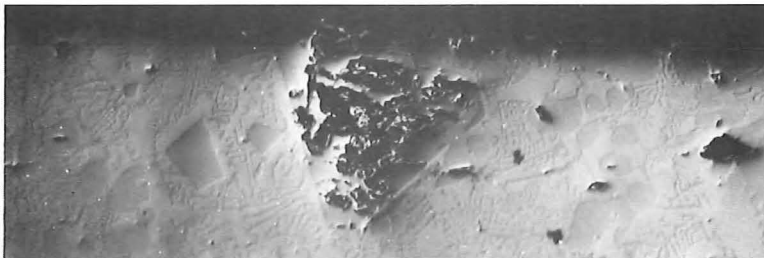
Kleine Risse in der oberflächennahen Schicht.  
Ausbrüche in Kornform an der Oberfläche.

6 b

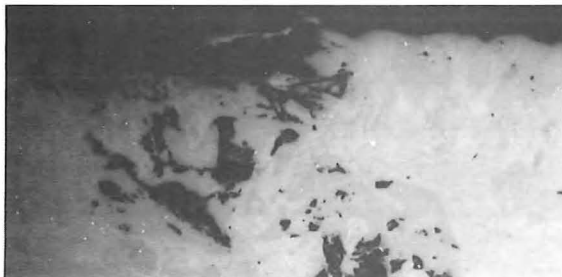


Tribaloy 800

Die oberflächennahen  
Karbide sind zerstört.  
Oberfläche stark auf-  
geraut.

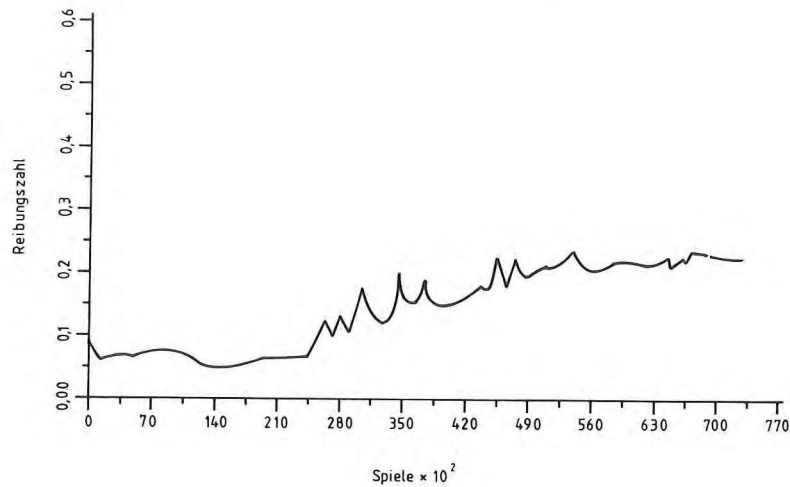


(200 : 1)



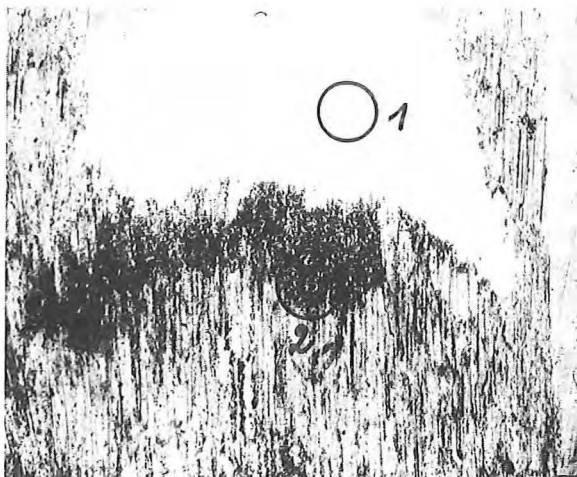
(200 : 1)

Reibungszahl für Werkstoffpaarung  
TH - TH  
in Helium-Atmosphäre



Paarung  
Nr. 7

Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,14	0,24	0,04	
Temperatur	23,0	37,3	19,0	°C
Feuchte	6,7	30,48	0,0	µbar

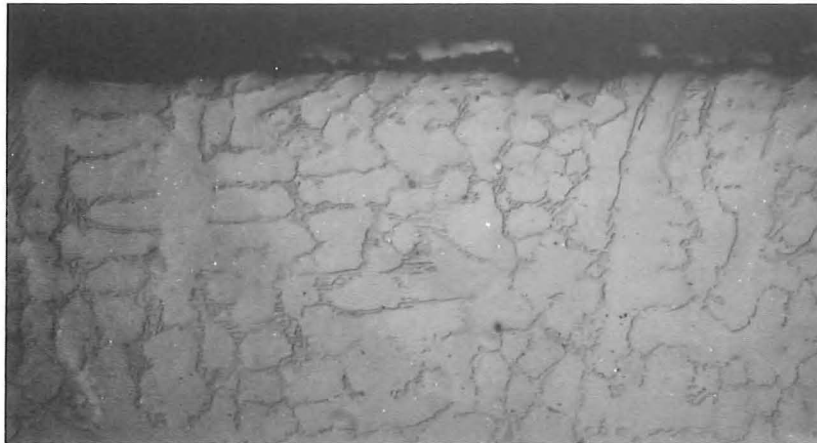


7 a

- 1) 650 HV 0,5
- 2) von 800 HV 0,5  
bis 1100 HV 0,5

- $R_s = 0,0 \mu m$
- $W_t = 10,0 \mu m$
- $R_{sv} = 4,2 \mu m$
- $W_{tv} = 47,3 \mu m$

7 a



Reibfläche

Auftragslegierung  
der TH-Aachen

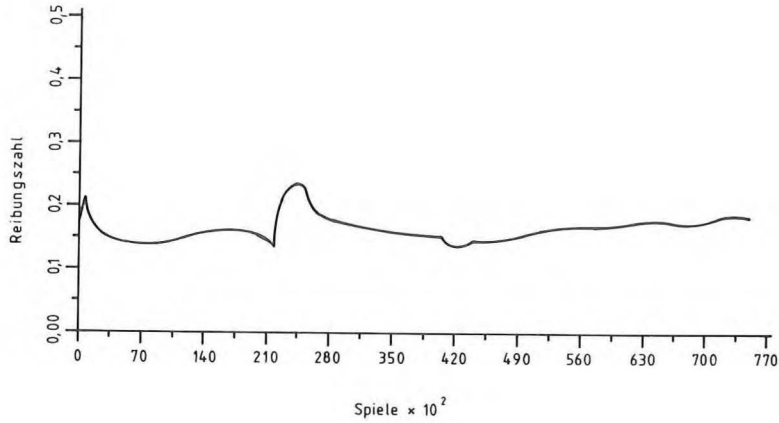
(200 : 1)



(500 : 1)

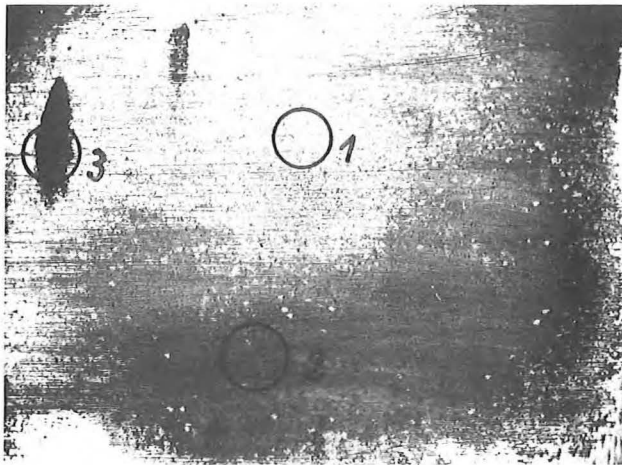
Geringer Auftrag einer 2. Schicht:  
Vermutlich liegt eine Übersmierung gelöster Teile der  
Auftragslegierung auf der Oberfläche vor.

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
TiC - TiC  
in Helium - Atmosphäre



Paarung  
Nr. 8

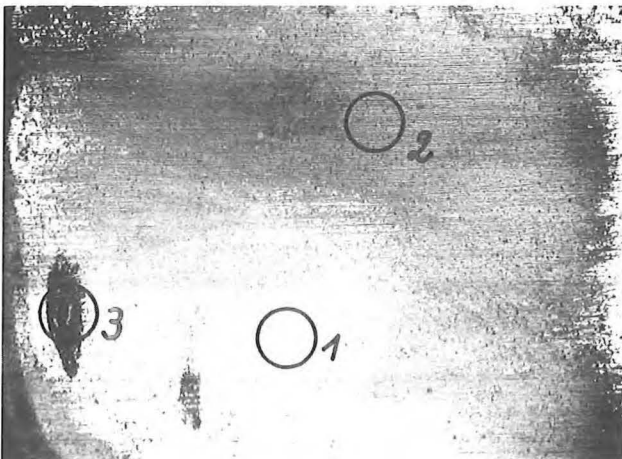
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,16	0,23	0,12	
Druck	2,0	2,0	1,0	bar



8 a

- 1) 2200 HV 0,5
- 2) 2050 HV 0,5
- 3) 1150 HV 0,5

- $R_s = 0,55 \mu m$
- $W_t = 6,9 \mu m$
- $R_{sv} = 0,55 \mu m$
- $W_{tv} = 6,4 \mu m$

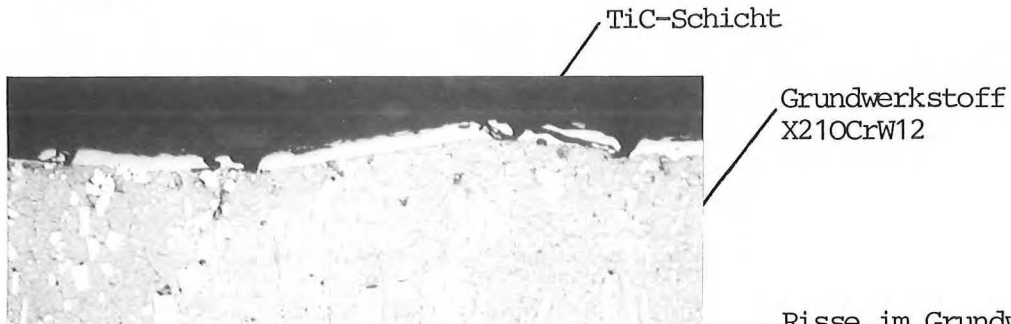


8 b

- 1) 2100 HV 0,5
- 2) 2000 HV 0,5
- 3) 1025 HV 0,5

- $R_s = 0,55 \mu m$
- $W_t = 9,1 \mu m$
- $R_{sv} = 0,85 \mu m$
- $W_{tv} = 9,95 \mu m$

8 a



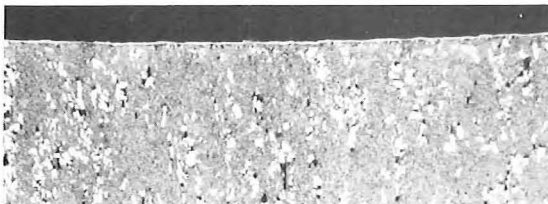
(200 : 1)

Risse im Grundwerkstoff.  
TiC-Schicht weitgehend  
vom Grundmaterial abge-  
löst und zerstört.



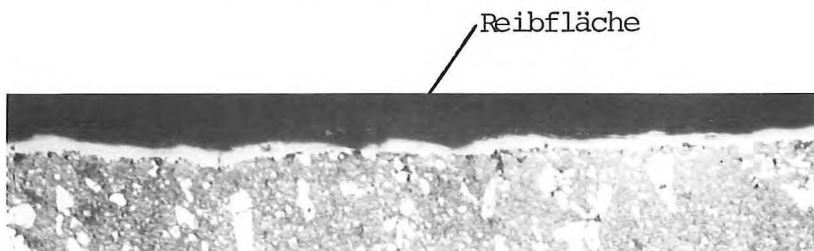
(500 : 1)

8 b



(50 : 1)

TiC-Schicht mit verein-  
zelten Ausbrüchen und  
Überlappungen.  
Schichtdicke ist gleich-  
mäßig.

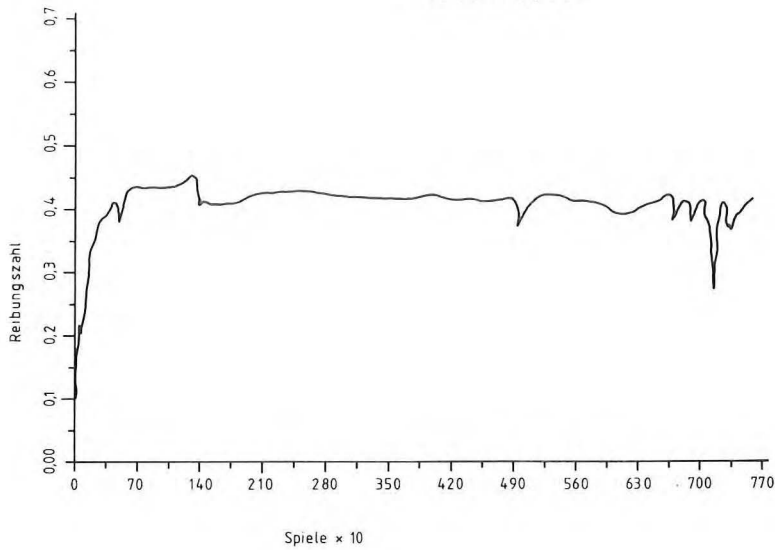


(200 : 1)



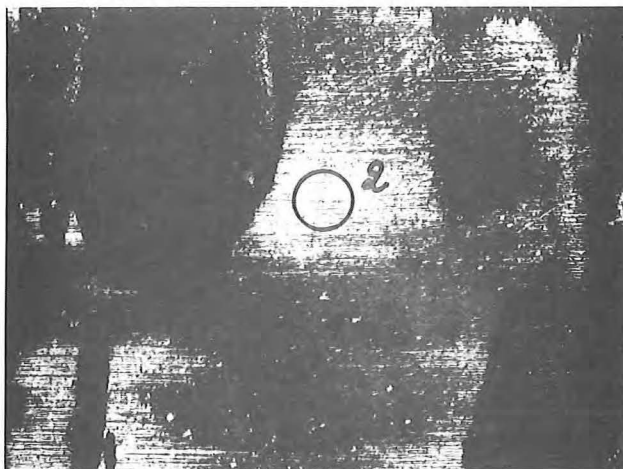
(500 : 1)

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
TiN - TiN  
in Helium - Atmosphäre



Paarung  
Nr. 9

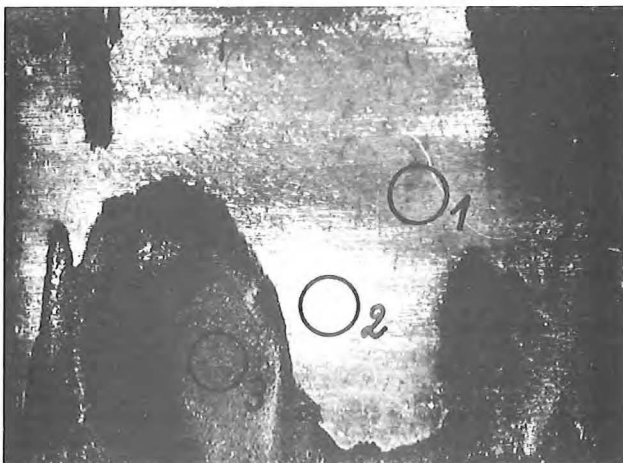
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,41	0,45	0,085	
Temperatur	22,1	24,5	0,0	°C
Feuchte	6,8	25,6	0,0	µbar



9 a

- 1) 690 HV 0,5
- 2) 630 HV 0,5
- 3) Härtemessung nicht durchführbar, da Schicht zu unregelmäßig ist

- $R_s = 0,45 \mu\text{m}$
- $W_t = 6,5 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 2,65 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 27,3 \mu\text{m}$

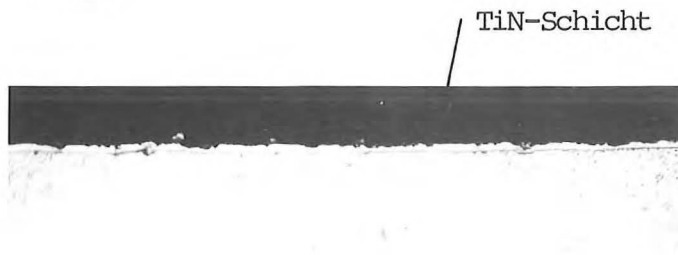


9 b

- 1) 640 HV 0,5
- 2) 550 HV 0,5
- 3) wie unter 9 a

- $R_s = 0,5 \mu\text{m}$
- $W_t = 7,4 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 4,5 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 41,0 \mu\text{m}$

9 a



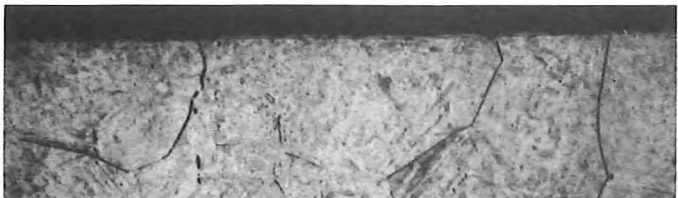
(500 : 1)



(500 : 1)

Zerklüftete, ausgebrochene TiN-Schicht.  
Die Schichtdicke ist gleichmäßig.

9 b



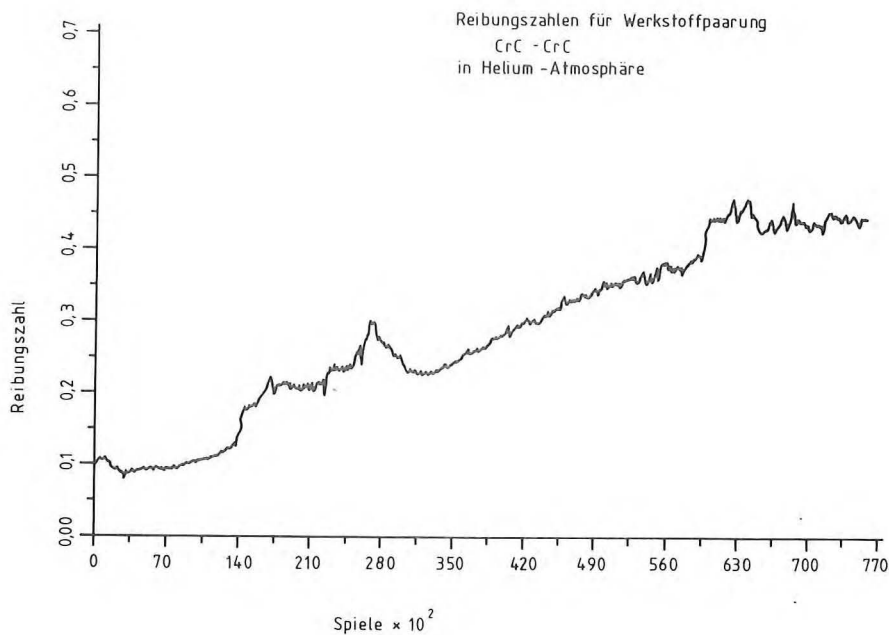
(200 : 1)



(500 : 1)

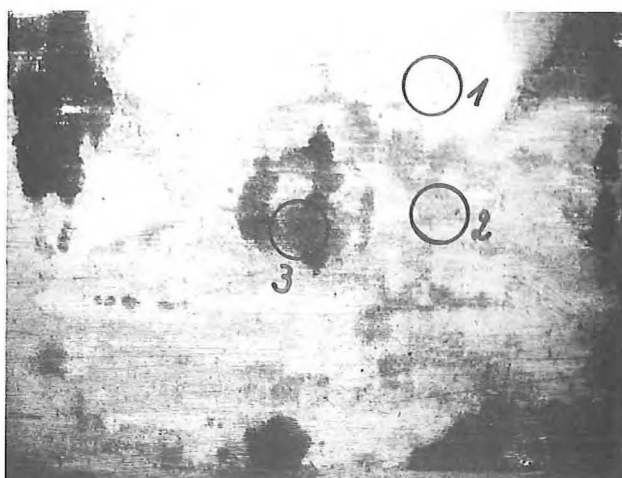
Reibfläche

Ungleichmäßige TiN-Schicht,  
sonst vergleichbar wie 9 a.



Paarung  
Nr.10

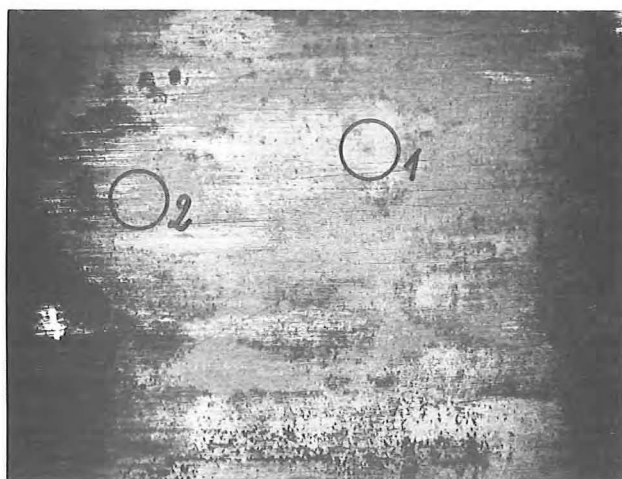
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,28	0,45	0,07	
Druck	2,1	2,6	1,1	bar



10 a

- 1) 1470 HV 0,5
- 2) 1390 HV 0,5
- 3) 1380 HV 0,5

- $R_S = 0,35 \mu m$
- $W_t = 4,0 \mu m$
- $R_{SV} = 0,35 \mu m$
- $W_{tv} = 4,7 \mu m$



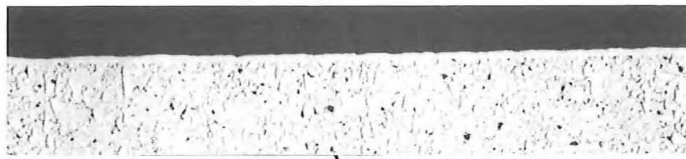
10 b

- 1) 1500 HV 0,5
- 2) 1470 HV 0,5

- $R_S = 0,4 \mu m$
- $W_t = 5,3 \mu m$
- $R_{SV} = 0,55 \mu m$
- $W_{tv} = 6,75 \mu m$



10 a



(50 : 1)

Grundwerkstoff  
X210CrW12

Geschlossene, gleich-  
mäßige CrC-Schicht mit  
geringen Defekten.

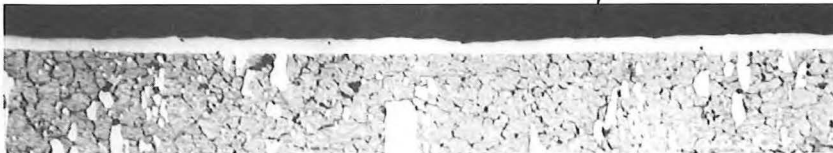
CrC-Schicht



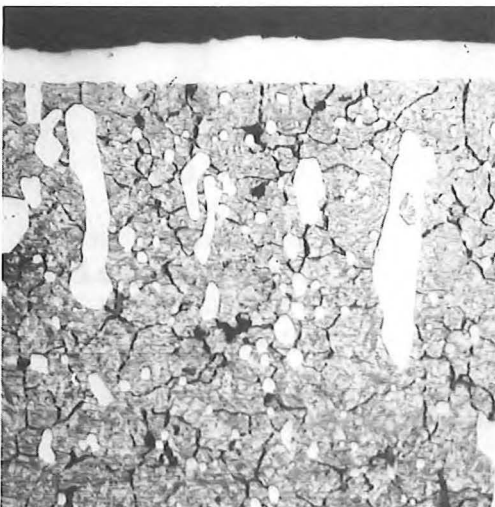
(500 : 1)

10 b

Reibfläche



(200 : 1)

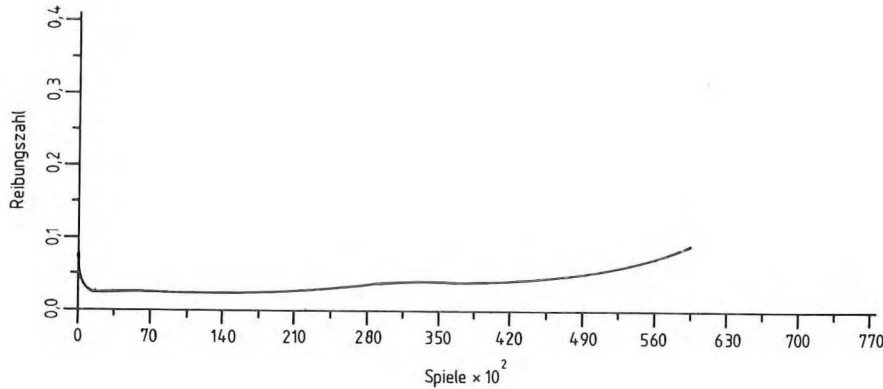


(500 : 1)

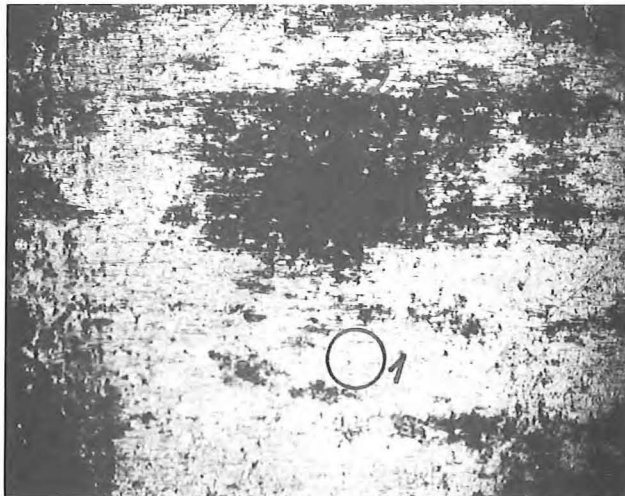
Gleichmäßige glatte CrC-Schicht,  
fast keine Ausbrüche.

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
Stellite 6 - Molybkombin 316  
in Helium - Atmosphäre

Paarung  
Nr. 11



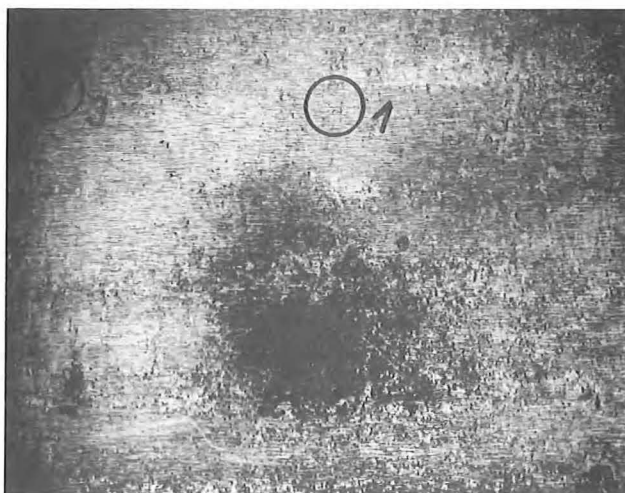
Spielzahl 60000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,04	0,1	0,015	
Druck	2,0	2,1	1,9	bar
Feuchte	7,0	24,0	3,0	μbar



11 a

- 1) 250 HV 0,5
  - 2) 170 HV 0,5
  - zu 1) und 2)
- Härteeindrücke waren  
nur in gewissen Grenzen  
auswertbar

- $R_s = 0,65 \mu\text{m}$
- $W_t = 6,2 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 1,25 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 10,4 \mu\text{m}$

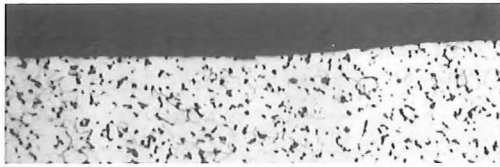


11 b

- 1) 560 HV 0,5
- 2) 580 HV 0,5
- 3) Wegen der starken  
Oberflächenrau-  
heit Härtemessung  
nicht möglich

- $R_s = 0,3 \mu\text{m}$
- $W_t = 4,4 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 0,4 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 4,4 \mu\text{m}$

11 a



Der makroskopische Oberflächenverlauf ist wellig. Die Gleitlackschicht ist nicht durchgehend vorhanden.

(50 : 1) Grundwerkstoff  
St37-2

Gleitlackschicht



(500 : 1)

11 b



Reibfläche  
Werkstoff Stellite 6

Glatte Stellite-Oberfläche.  
Stellenweise ist eine dünne  
Gleitlackschicht aufgetragen.

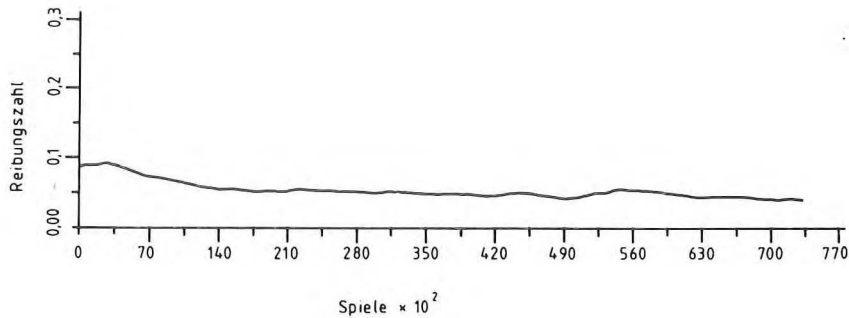
(50 : 1)



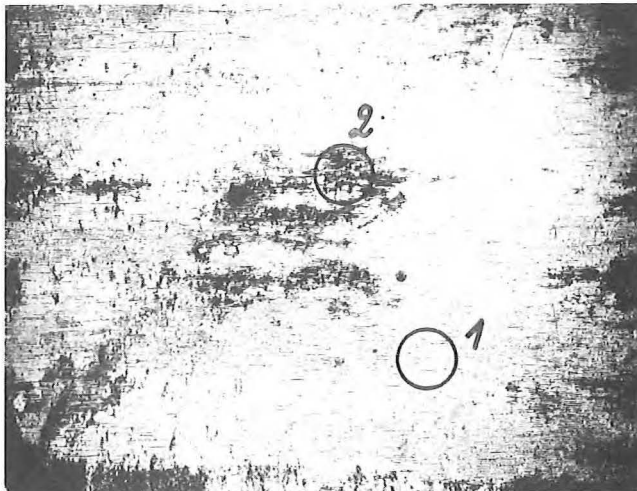
(200 : 1)

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
Stellite 6 - Gleitlack 321 R  
in Helium-Atmosphäre

Paarung  
Nr.12



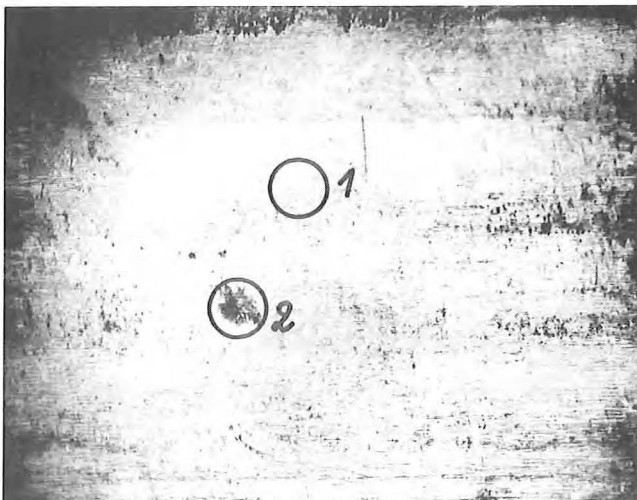
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,05	6,95	0,02	
Druck	1,9	2,1	1,8	bar
Feuchte	6,5	17,8	3,2	µbar



12 a

- 1) 210 HV 0,5
  - 2) von 140 HV 0,5  
bis 230 HV 0,5
- zu 1) und 2)  
Härteeindrücke waren  
nur in gewissen Grenzen  
auswertbar

- $R_s = 0,7 \mu\text{m}$
- $W_t = 6,0 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 0,6 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 8,2 \mu\text{m}$

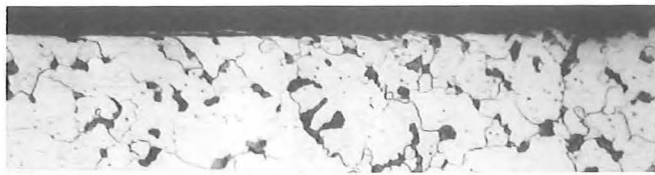


12 b

- 1) 660 HV 0,5
- 2) 680 HV 0,5

- $R_s = 0,2 \mu\text{m}$
- $W_t = 3,7 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 0,25 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 3,2 \mu\text{m}$

12 a



Grundwerkstoff  
St37-2

(200 : 1)

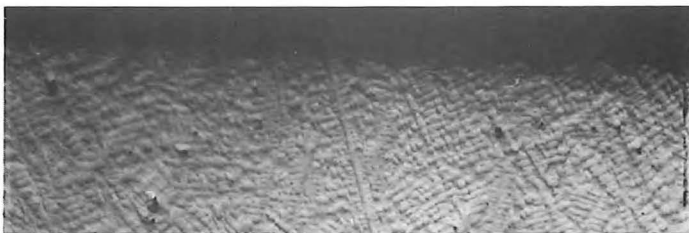
Gleitlackschicht



Der Gleitlack ist als  
dunkle Schicht erkennbar.  
Schicht ungleichmäßig und  
lückenhaft.

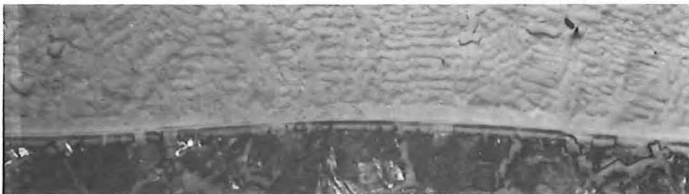
(500 : 1)

12 b



Reibfläche

Stellite 6



Grundwerkstoff  
St37-2

(50 : 1)

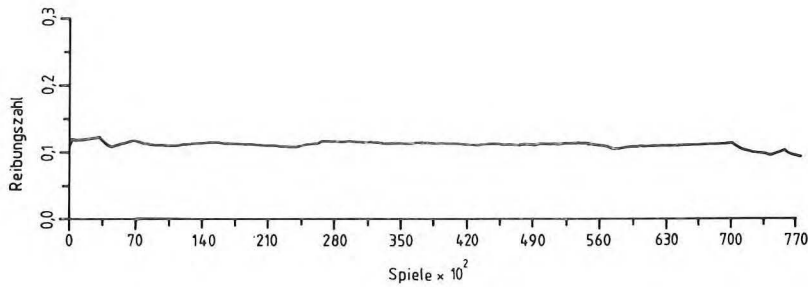


(200 : 1)

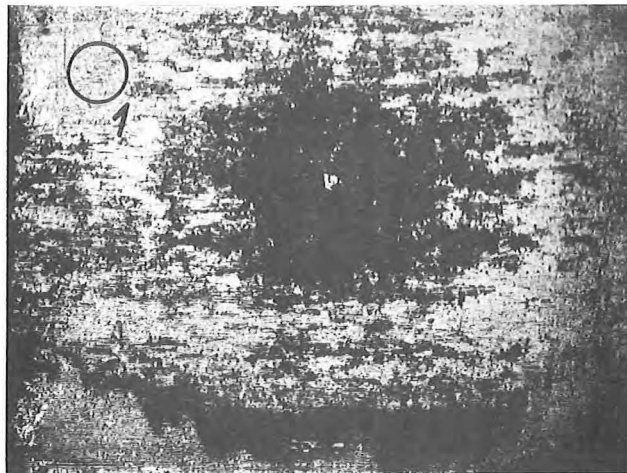
Glatte Stellite 6-Oberfläche.  
Eine übertragene Gleitlackschicht ist  
nicht erkennbar.

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
Delfer B - Gleitlack (Molybdkombin 316)  
in Helium-Atmosphäre

Paarung  
Nr. 13



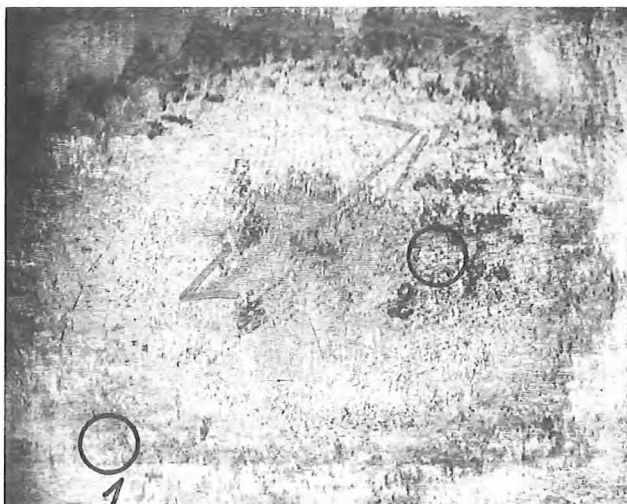
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,11	0,12	0,08	
Druck	2,1	2,15	1,9	bar
Feuchte	6,8	13,2	3,9	µbar



13 a

- 1) 170 HV 0,5
  - 2) 190 HV 0,5
  - zu 1) und 2)
- Härteeindrücke waren  
nur in gewissen Grenzen  
auswertbar

- $R_s = 0,75 \mu\text{m}$
- $W_t = 8,0 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 1,5 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 15,5 \mu\text{m}$

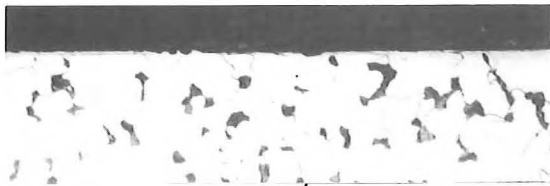


13 b

- 1) 1000 HV 0,5
- 2) von 750 HV 0,5  
bis 970 HV 0,5

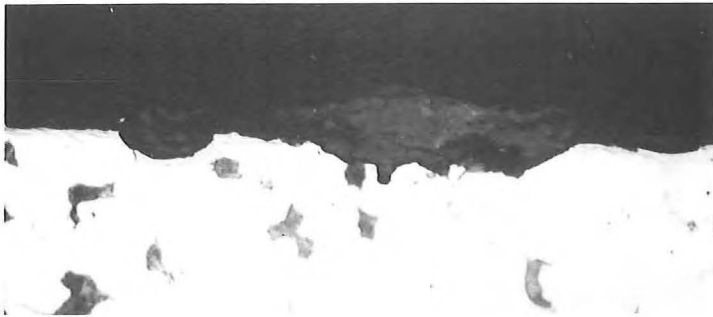
- $R_s = 0,15 \mu\text{m}$
- $W_t = 3,4 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 0,35 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 5,1 \mu\text{m}$

13 a



(200 : 1) / Grundwerkstoff  
St37-2

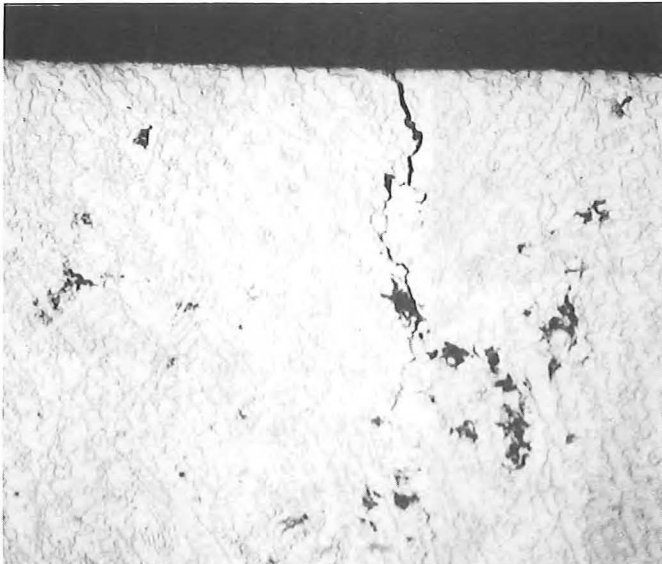
Glatte Oberfläche.  
Stellenweise ist die  
Gleitlackschicht er-  
kennbar.



(500 : 1)

Gleitlackschicht  
(Reibfläche)

13 b



Reibfläche

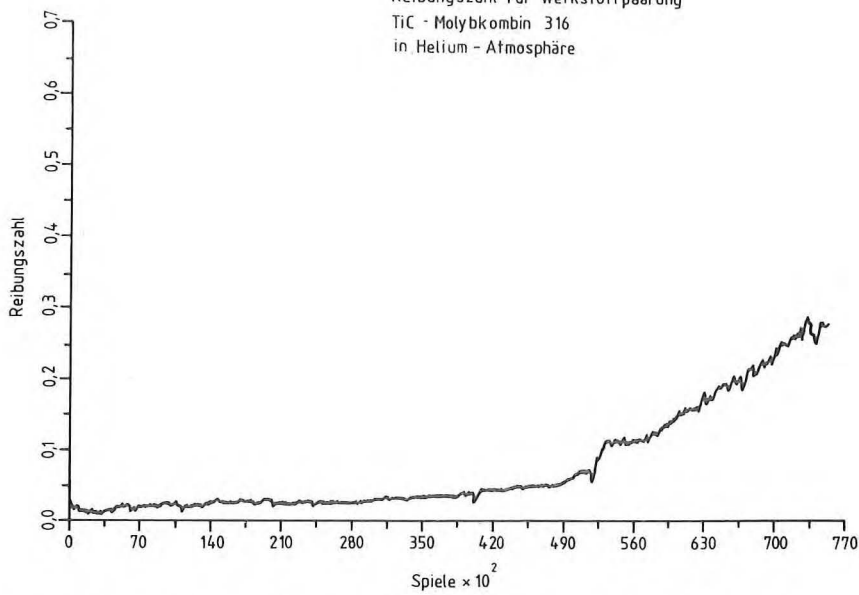
Delfer B

(200 : 1)

Glatte Oberfläche.  
Vereinzelte Risse in der Delfer B-Schicht.

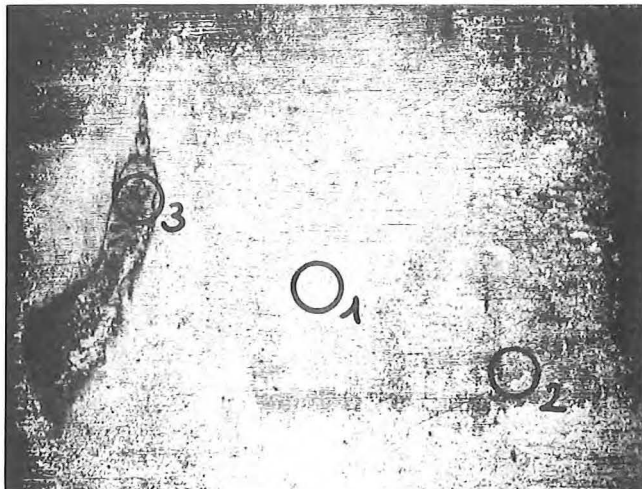


Reibungszahl für Werkstoffpaarung  
TiC - Molybkombin 316  
in Helium - Atmosphäre



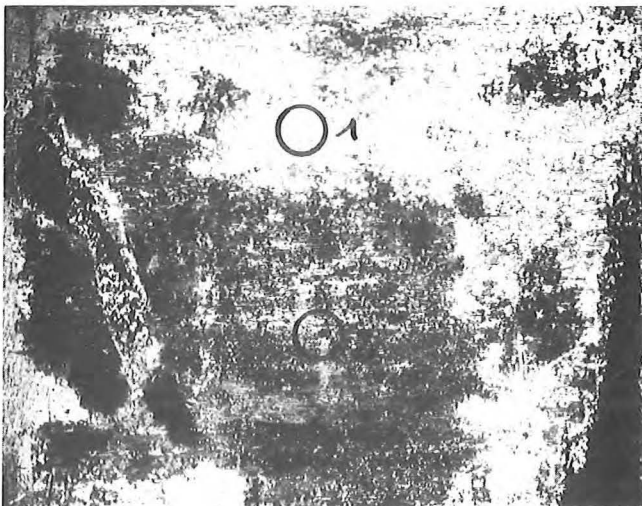
Paarung  
Nr.14

Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,08	0,3	0,01	
Druck	2,1	2,7	0,7	bar
Feuchte	3,8	8,1	1,9	µbar



14 a

- 1) 1990 HV 1
- 2) von 1420 HV 1  
bis 2070 HV 1
- 3) 1420 HV 1
  - $R_s = 0,6 \mu\text{m}$
  - $W_t = 8,25 \mu\text{m}$
  - $R_{sv} = 0,8 \mu\text{m}$
  - $W_{tv} = 8,75 \mu\text{m}$



14 b

- 1) von 200 HV 0,5  
bis 440 HV 0,5
- 2) 270 HV 0,5
  - $R_s = 1,25 \mu\text{m}$
  - $W_t = 15,7 \mu\text{m}$
  - $R_{sv} = 3,6 \mu\text{m}$
  - $W_{tv} = 37,7 \mu\text{m}$



14 a



TiC-Schicht an mehreren Stellen ausgebrochen. Riß im Grundmaterial.

Grundwerkstoff  
X210CrW12

(200 : 1)



TiC-Schicht

(500 : 1)

14 b



Reste der Gleitlack-  
schicht erkennbar.  
Werkstoffoberfläche  
mechanisch verformt.

(200 : 1)

Grundwerkstoff  
St37-2

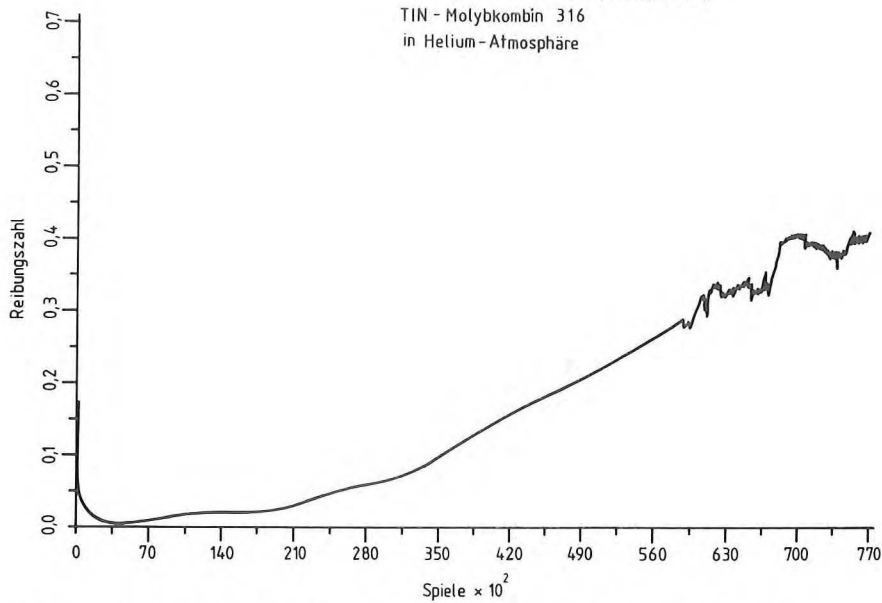
Reibfläche  
gleitlackbeschichtet



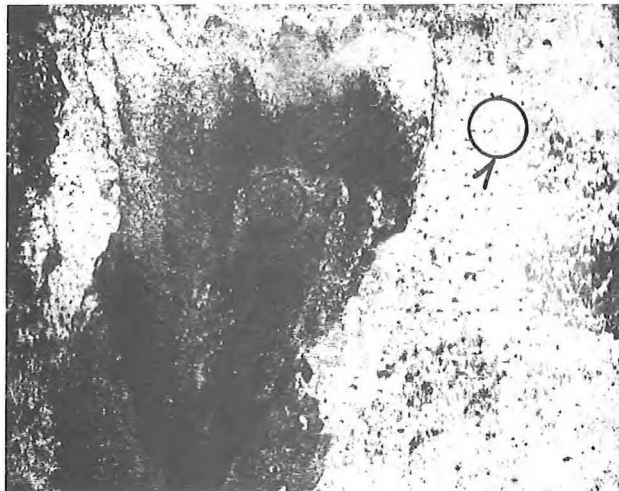
(500 : 1)

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
TIN - Molybdkombin 316  
in Helium-Atmosphäre

Paarung  
Nr. 15



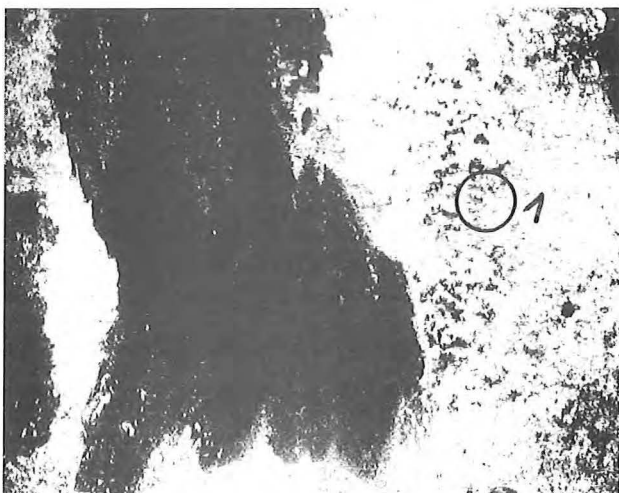
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,15	0,43	0,006	
Druck	1,9	2,3	1,0	bar
Feuchte	4,8	14,2	2,5	$\mu$ bar



15 a

- 1) 510 HV 0,5
- 2) 530 HV 0,5

- $R_s = 1,05 \mu m$
- $W_t = 14,85 \mu m$
- $R_{sv} = 4,1 \mu m$
- $W_{tv} = 33,7 \mu m$



15 b

- 1) 170 HV 0,5
- 2) von 120 HV 0,5  
bis 260 HV 0,5

- $R_s = 0,8 \mu m$
- $W_t = 10,25 \mu m$
- $R_{sv} = 7,0 \mu m$
- $W_{tv} = 52,5 \mu m$

15 a



(200 : 1)

Grundwerkstoff  
X20Cr13



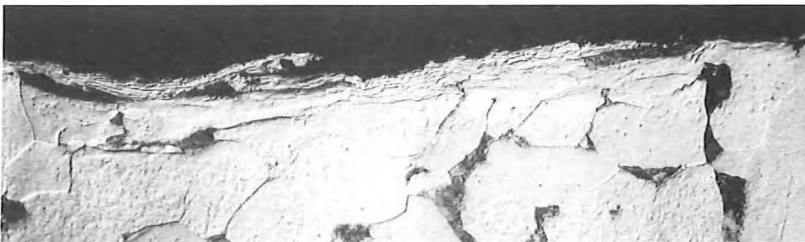
(500 : 1)

Keine TiN-Schicht  
nachweisbar.  
Die Oberfläche ist  
aufgeraut.

15 b



(200 : 1)

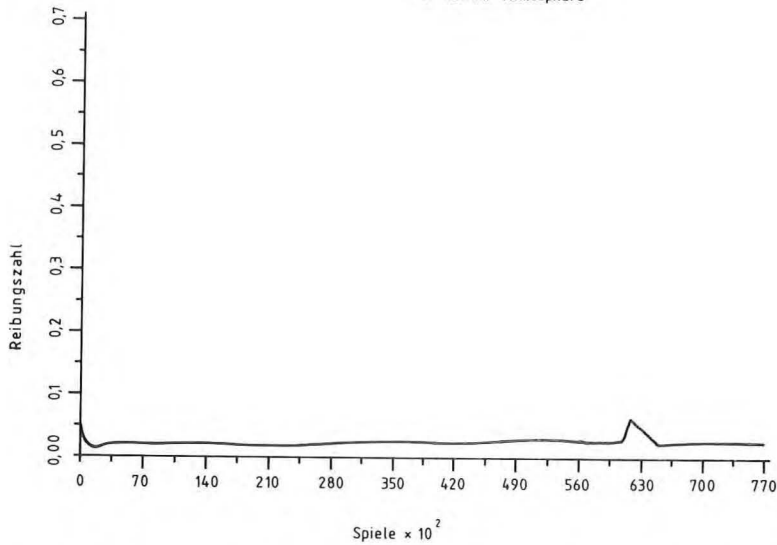


(500 : 1)

Grundwerkstoff  
St37-2

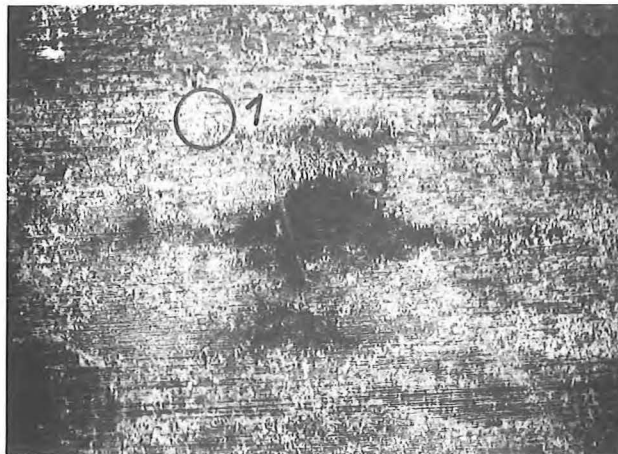
Keine Gleitlackschicht erkennbar.  
Die Oberfläche des Grundwerkstoffes ist  
mechanisch verformt.

Reibungszahlen für Werkstoffprüfung  
CrC - Molybdkombin 316  
in Helium - Atmosphäre



Paarung  
Nr.16

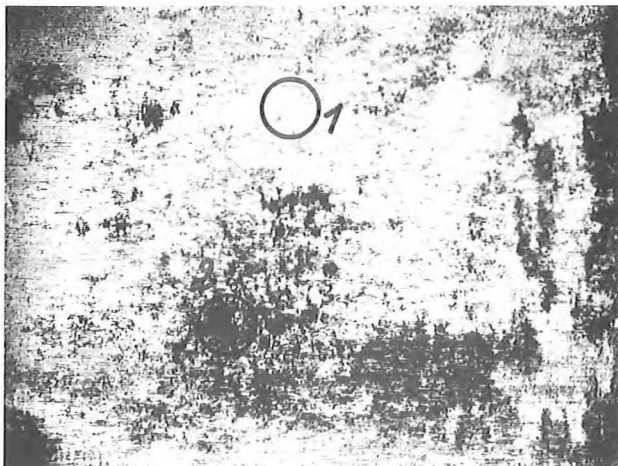
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,02	0,07	0,01	
Druck	2,0	2,9	0,6	bar
Feuchte	4,0	11,5	2,5	µbar



16 a

- 1) 1120 HV 0,5
- 2) 1320 HV 0,5
- 3) 1300 HV 0,5

- $R_s = 0,45 \mu m$
- $W_t = 5,0 \mu m$
- $R_{sv} = 0,5 \mu m$
- $W_{tv} = 6,6 \mu m$

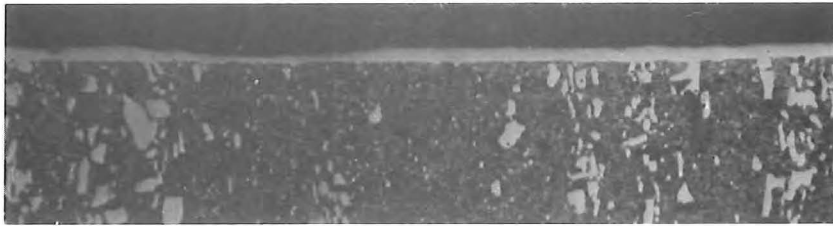


16 b

- 1) 130 HV 0,5
- 2) 120 HV 0,5

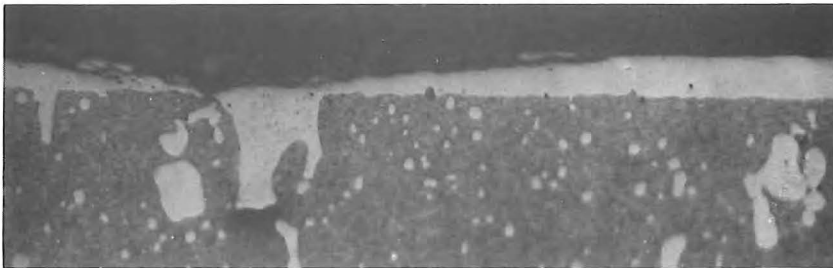
- $R_s = 0,55 \mu m$
- $W_t = 7,4 \mu m$
- $R_{sv} = 1,75 \mu m$
- $W_{tv} = 20,9 \mu m$

16 a



Grundwerkstoff  
X210CrW12

(200 : 1)



CrC-Schicht

(500 : 1)

Ungleichmäßige CrC-Schicht mit vielen Ausbrüchen.

16 b



Grundwerkstoff  
St37-2

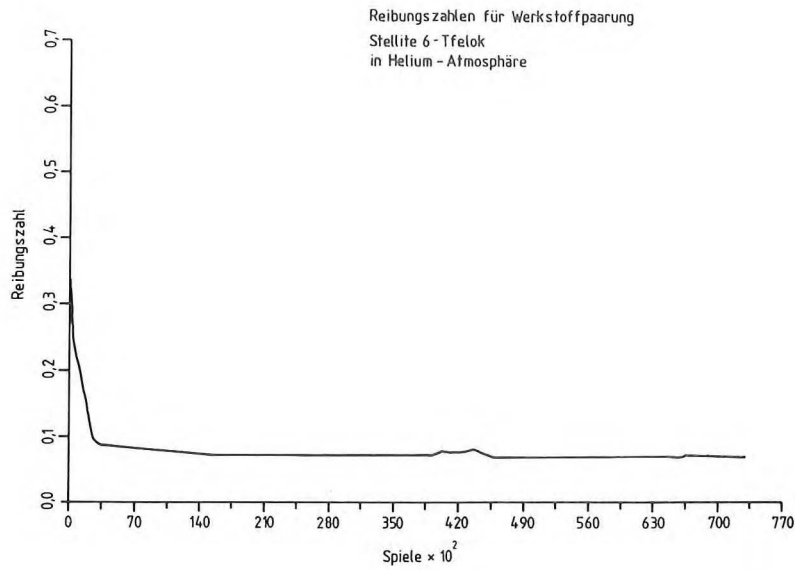
(200 : 1)



Gleitlackschicht

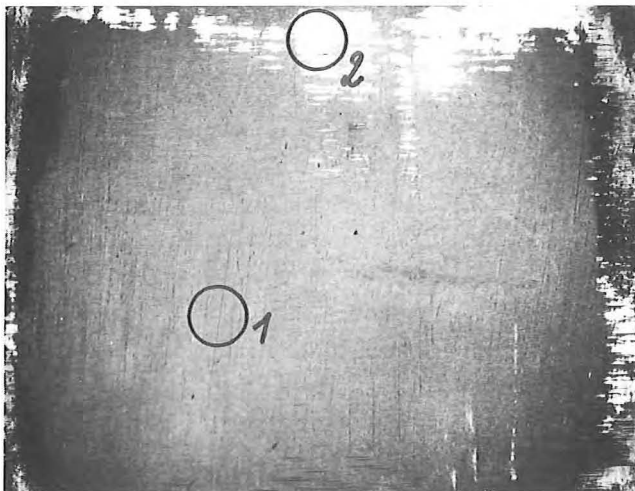
(500 : 1)

An einigen Stellen sind Reste der Gleitlack-  
beschichtung nachweisbar.  
Oberfläche des Grundwerkstoffes mechanisch  
verformt.



Paarung  
Nr. 17

Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,08	0,34	0,06	
Druck	1,9	2,4	0,8	bar



17 a

- 1) 560 HV 0,1
- 2) 840 HV 0,1
- 3) von 650 HV 0,1  
bis 240 HV 0,1

- $R_s = 0,15 \mu\text{m}$
- $W_t = 4,35 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 0,7 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 8,0 \mu\text{m}$

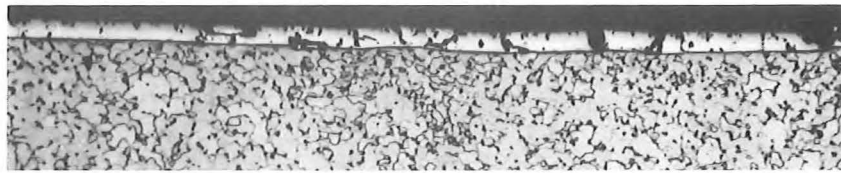


17 b

- 1) 740 HV 0,5
- 2) von 290 HV 0,5  
bis 580 HV 0,5

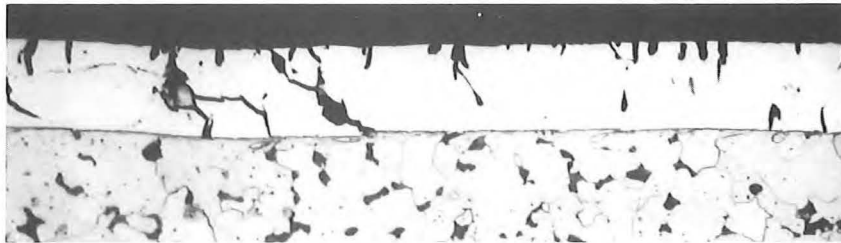
- $R_s = 1,65 \mu\text{m}$
- $W_t = 12,2 \mu\text{m}$
- $R_{sv} = 0,85 \mu\text{m}$
- $W_{tv} = 16,75 \mu\text{m}$

17 a



Grundwerkstoff

(50 : 1)



Tfelok-Schicht  
(Hartchrom  
+ PTFE)

(200 : 1)

Gleichmäßige Tfelok-Schicht.

In den beim Auftragsverfahren erzeugten Oberflächenrissen der Hartchromschicht ist PTFE eingelagert.

Die Durchgehenden Risse in der Hartchromschicht sind durch mechanische Belastungen während des Versuchsbetriebes zu erklären.

17 b



(50 : 1)

Stellite 6

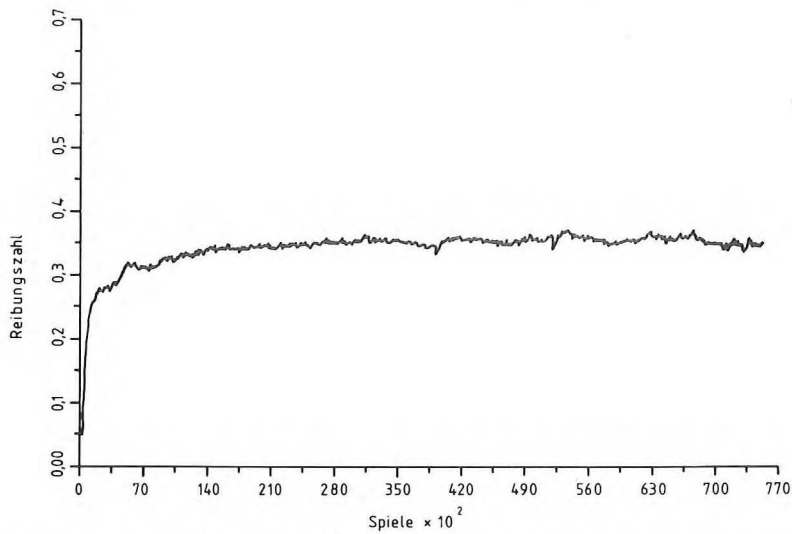


(500 : 1)

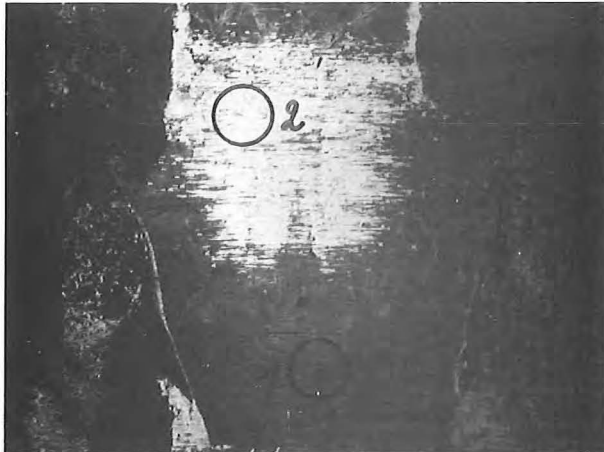
An einigen Stellen ist ein aufgeriebener 2. Werkstoff (PTFE) nachweisbar.

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
TiC - Teflon  
in Helium - Atmosphäre

Paarung  
Nr. 18



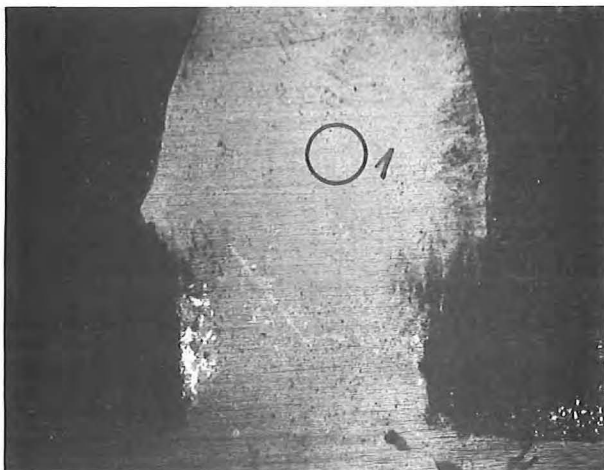
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,34	0,4	0,03	
Druck	2,0	2,1	0,1	bar
Feuchte	3,5	3,8	0,8	μbar



18 a

- 1) 530 HV 0,1
- 2) 780 HV 0,1
- 3) von 130 HV 0,1  
bis 780 HV 0,1

- $R_s = 0,3 \mu m$
- $W_t = 5,0 \mu m$
- $R_{sv} = 2,6 \mu m$
- $W_{tv} = 46,3 \mu m$



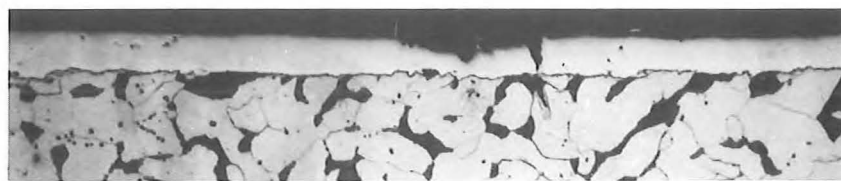
18 b

- 1) 2195 HV 0,5
- 2) 1670 HV 0,5

- $R_s = 0,55 \mu m$
- $W_t = 5,9 \mu m$
- $R_{sv} = 2,55 \mu m$
- $W_{tv} = 19,8 \mu m$



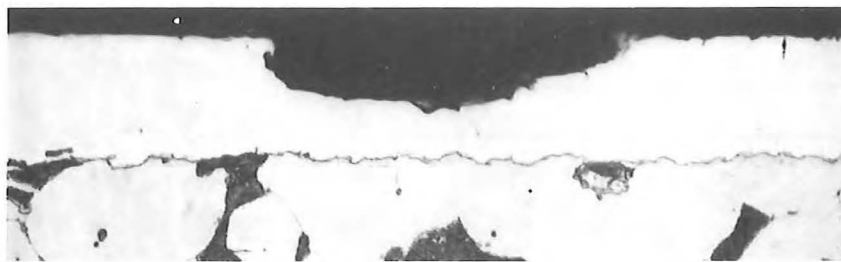
18 a



Tfelok-Schicht

Grundwerkstoff  
St37-2

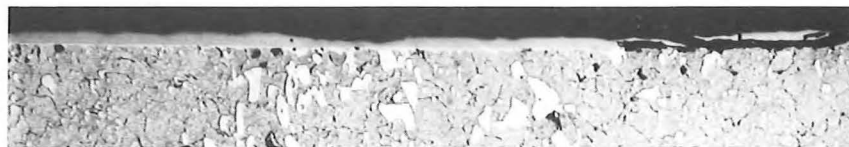
(200 : 1)



(500 : 1)

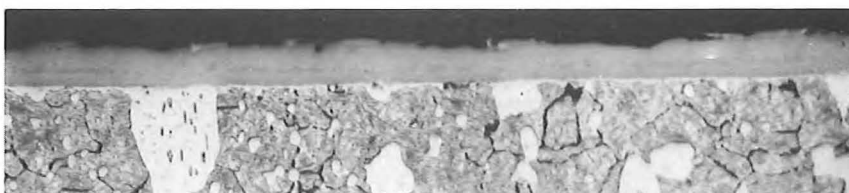
Tfelok-Schicht mit geringen PTFE-Einlagerungen  
und einigen Ausbrüchen.

18 b



(50 : 1)

TiC-Schicht

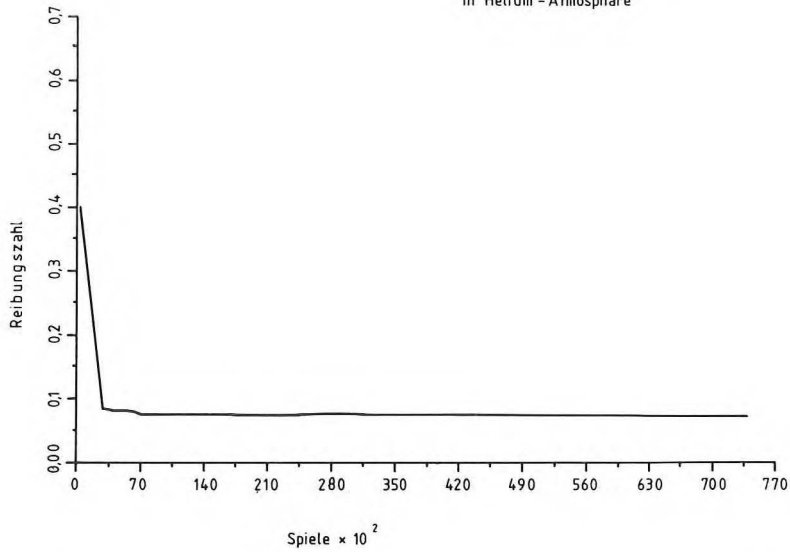


Grundwerkstoff  
X210CrW12

(200 : 1)

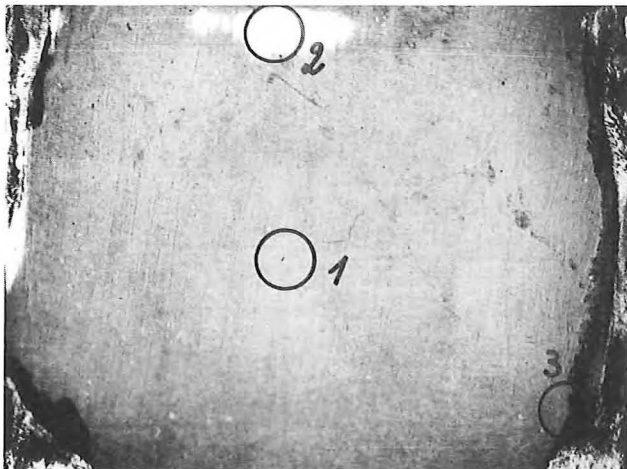
Stark geschädigte TiC-Schicht mit vielen Ausbrüchen

Reibungszahlen für Werkstoffpaarung  
Teflok - Teflok  
in Helium - Atmosphäre



Paarung  
Nr. 19

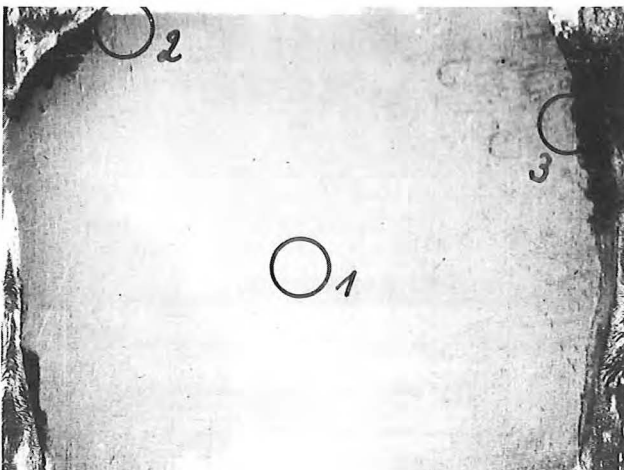
Spielzahl 75000	Mittelw.	Größtw.	Kleinstw.	
Reibzahl	0,07	0,42	0,06	
Druck	2,0	2,2	0,3	bar
Feuchte	3,6	4,8	2,8	μbar



19 a

- 1) 460 HV 0,1
- 2) 820 HV 0,1
- 3) von 460 HV 0,1  
bis 890 HV 0,1

- $R_s = 0,2 \mu m$
- $W_t = 5,55 \mu m$
- $R_{sv} = 0,7 \mu m$
- $W_{tv} = 10,5 \mu m$

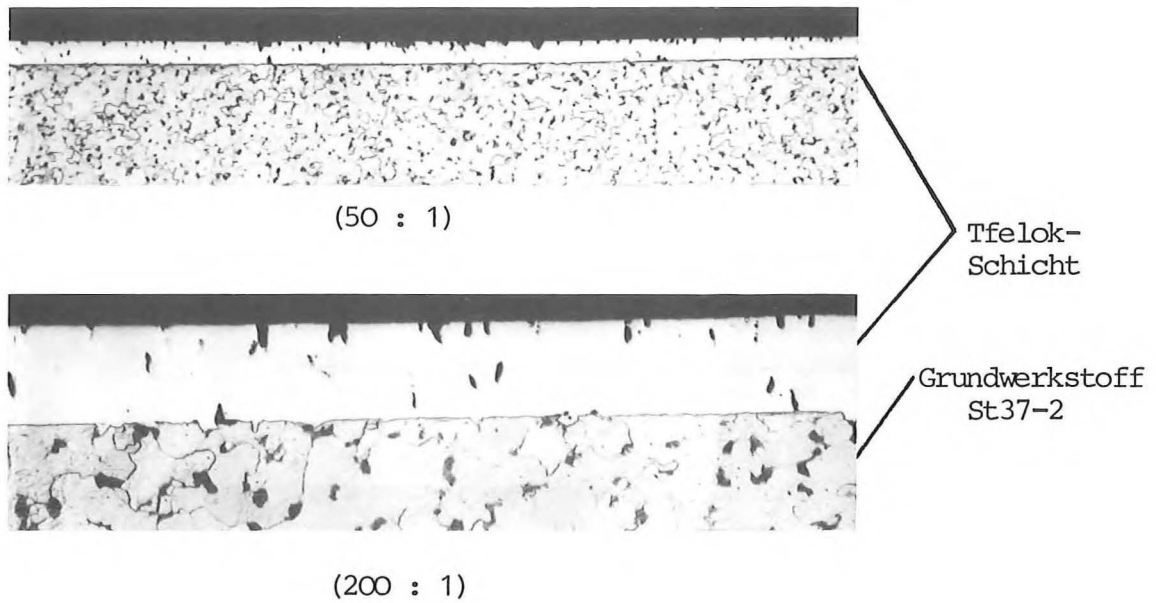


19 b

- 1) 565 HV 0,1
- 2) 850 HV 0,1
- 3) von 290 HV 0,1  
bis 940 HV 0,1

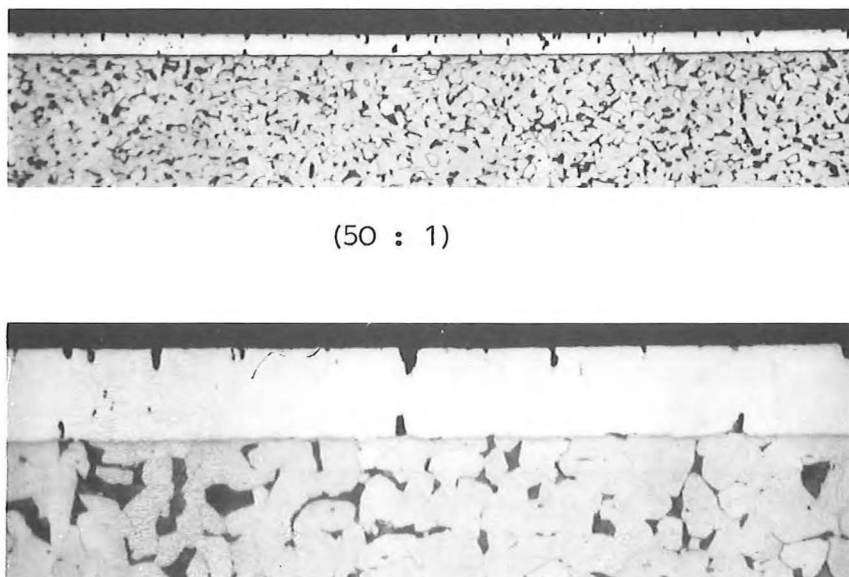
- $R_s = 0,1 \mu m$
- $W_t = 4,2 \mu m$
- $R_{sv} = 2,7 \mu m$
- $W_{tv} = 34,4 \mu m$

19 a



Gleichmäßige, gut ausgeprägte Tfelok-Schicht.

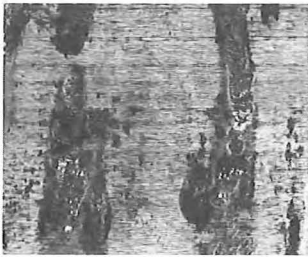
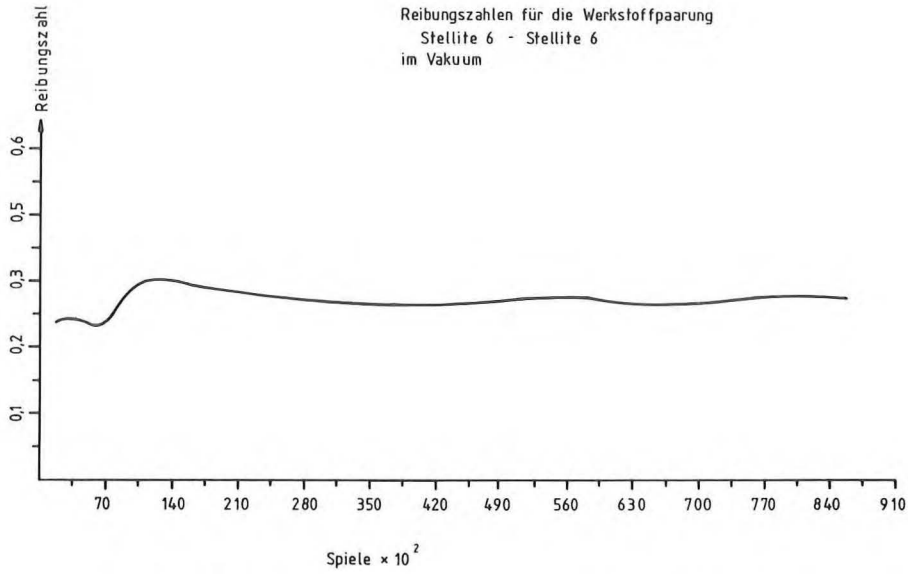
19 b



Tfelok-Schicht vergleichbar 19 a.

Reibungszahlen für die Werkstoffpaarung  
Stellite 6 - Stellite 6  
im Vakuum

Paarung  
Nr. 20



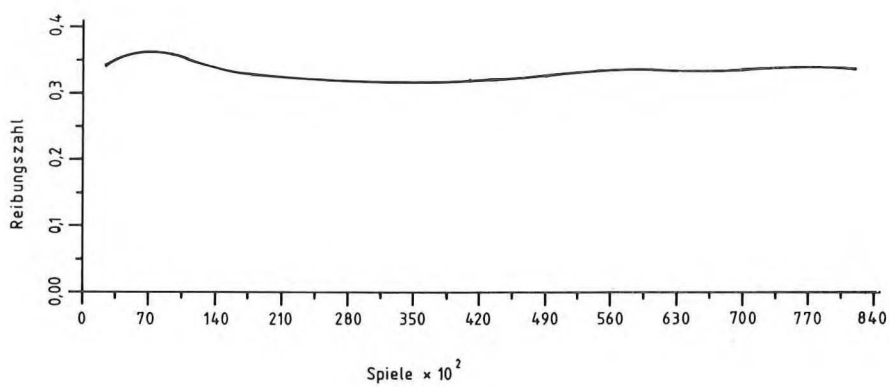
20 a



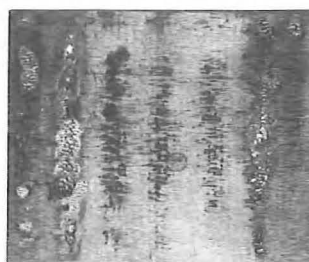
20 b

Reibungszahlen für die Werkstoffpaarung  
Stellite 20 - Stellite 20  
im Vakuum

Paarung  
Nr. 21

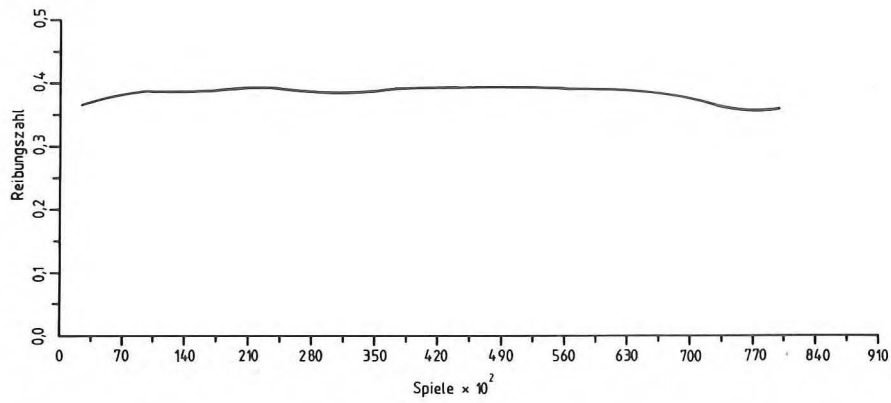


21 a

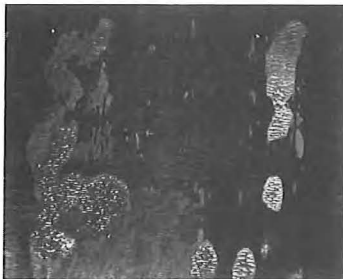


21 b

Reibungszahlen für die Werkstoffpaarung  
PW 60 K / PW 60K  
im Vakuum



Paarung  
Nr. 22

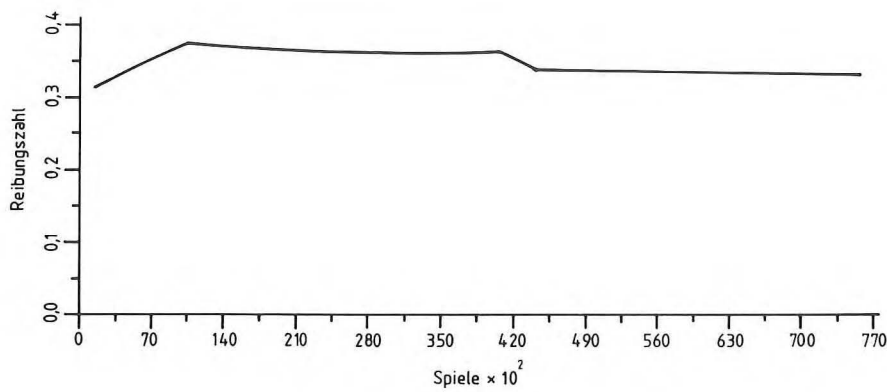


22 a



22 b

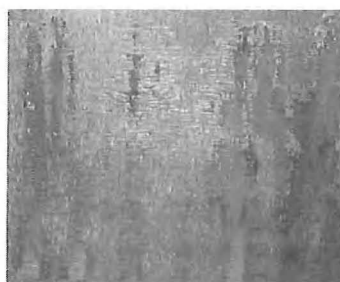
Reibungszahlen für die Werkstoffpaarung  
Delfer B - Delfer B  
im Vakuum



Paarung  
Nr. 23

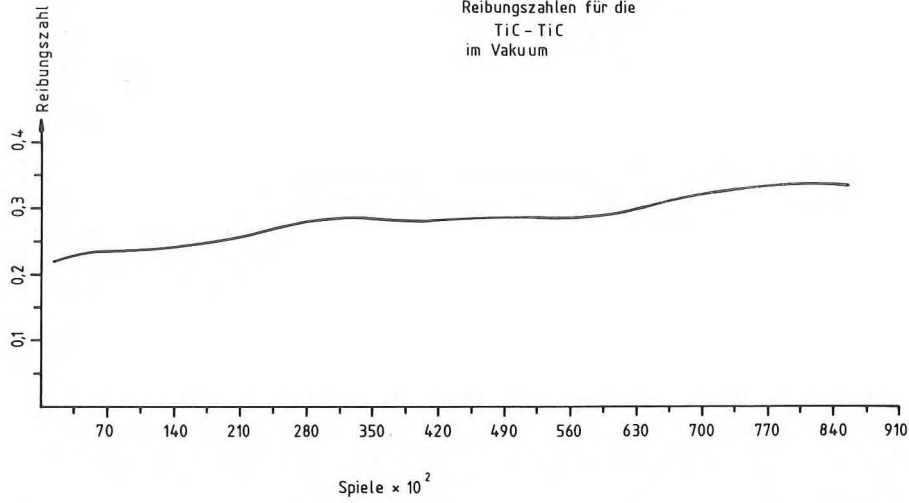


23 a

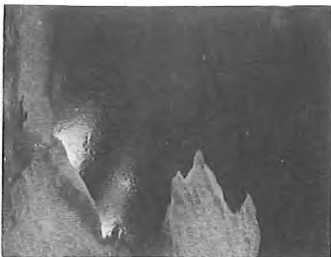


23 b

Reibungszahlen für die  
TiC - TiC  
im Vakuum



Paarung  
Nr. 24

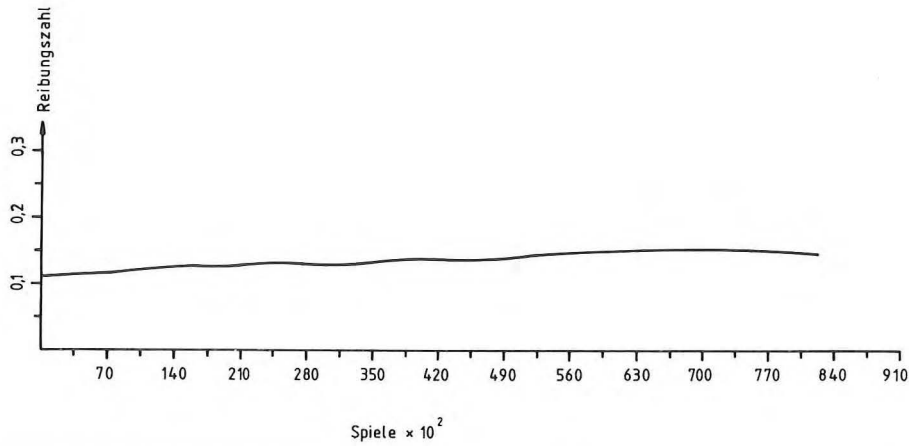


24 a



24 b

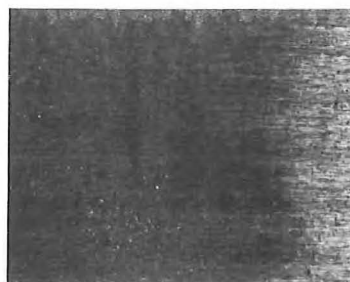
Reibungszahlen für die Werkstoffpaarung  
Delfer B / Molybkombin 316  
im Vakuum



Paarung  
Nr. 25



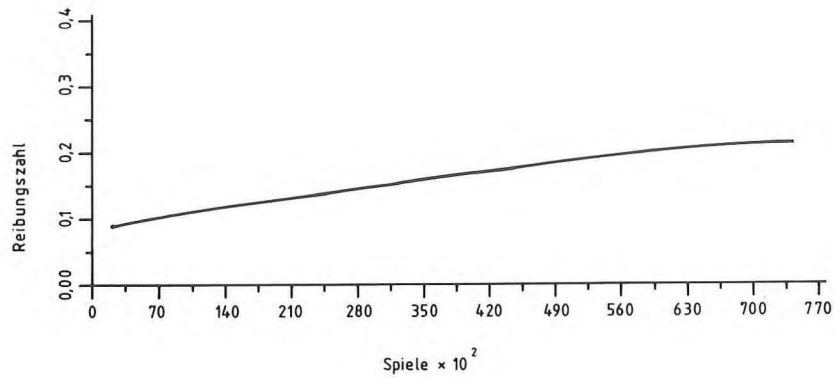
25 a



25 b

Reibungszahlen für die Werkstoffpaarung  
Stellit 6 - Molybkombin 316  
im Vakuum

Paarung  
Nr. 26



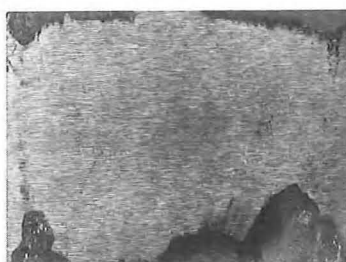
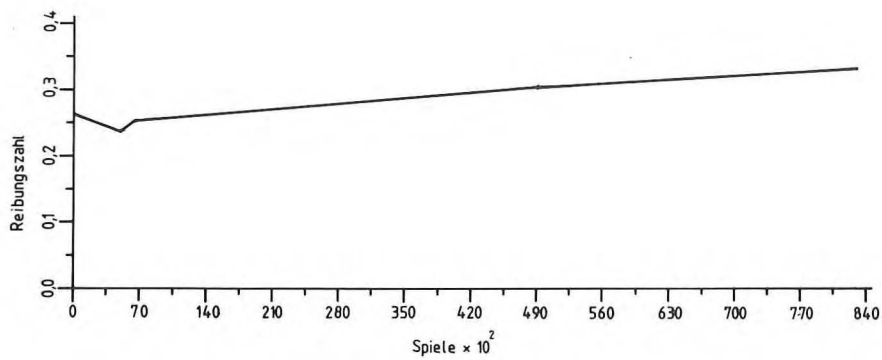
26 a



26 b

Reibungszahlen für die Werkstoffpaarung  
Stellite 6 - Teflok  
im Vakuum

Paarung  
Nr. 27



27 a



27 b





### Vergleich der Reibpaarungen

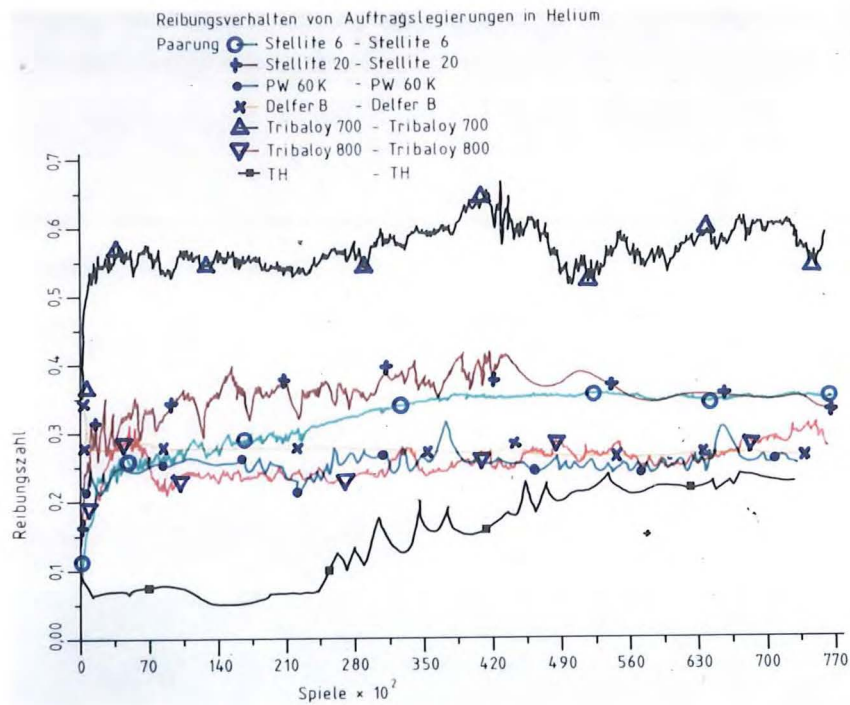


Bild 14: Reibungsverhalten von Auftragslegierungen in Helium-Atmosphäre

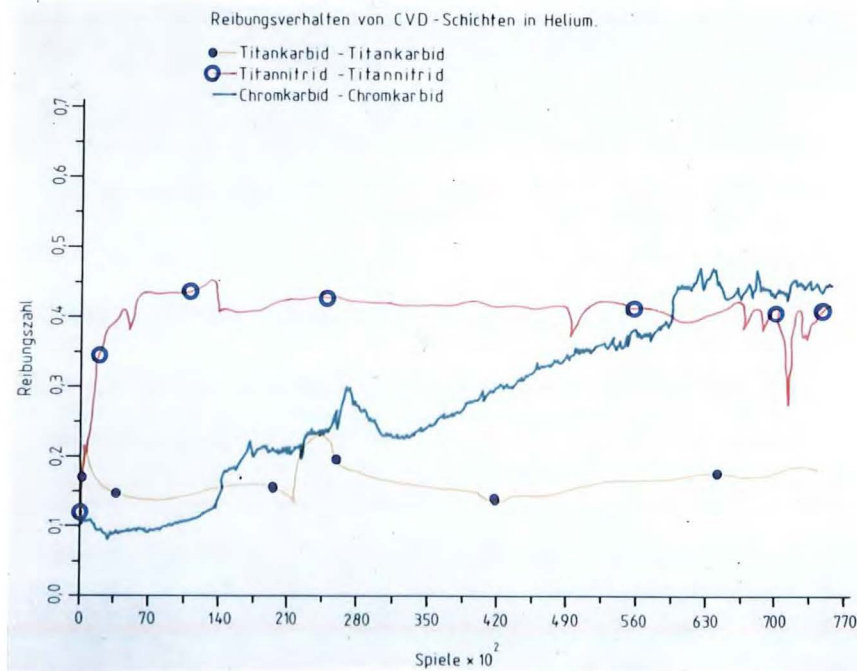


Bild 15: Reibungsverhalten von CVD-Schichten in Helium-Atmosphäre

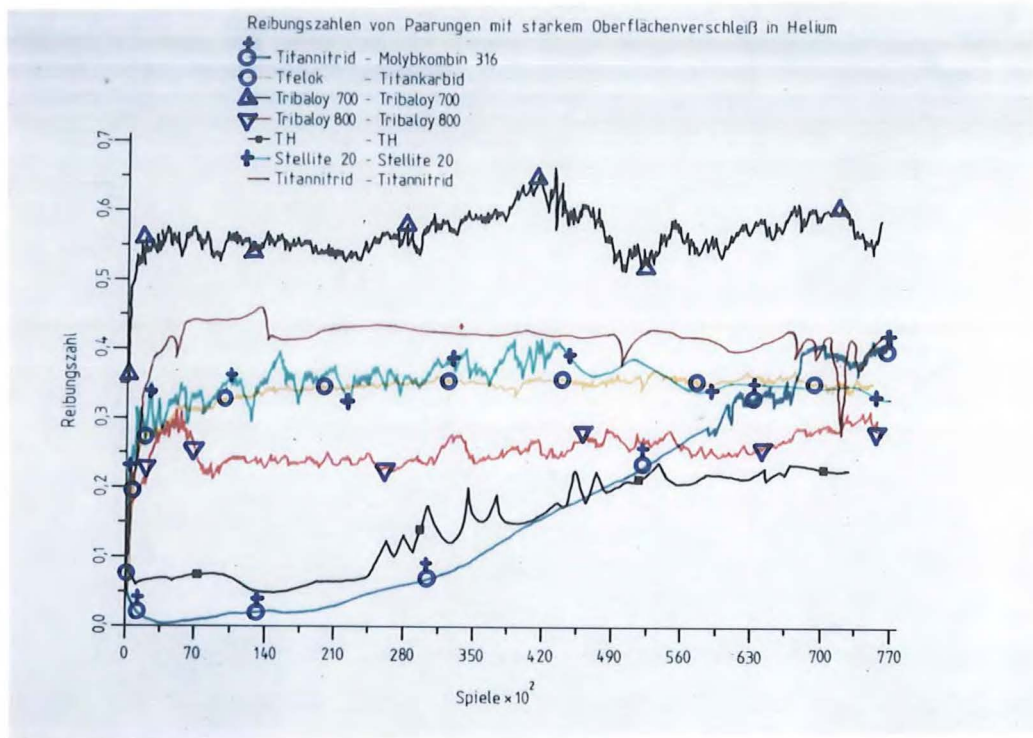


Bild 16: Reibungszahlen von Werkstoffpaarungen mit starkem Oberflächenverschleiß in Helium-Atmosphäre

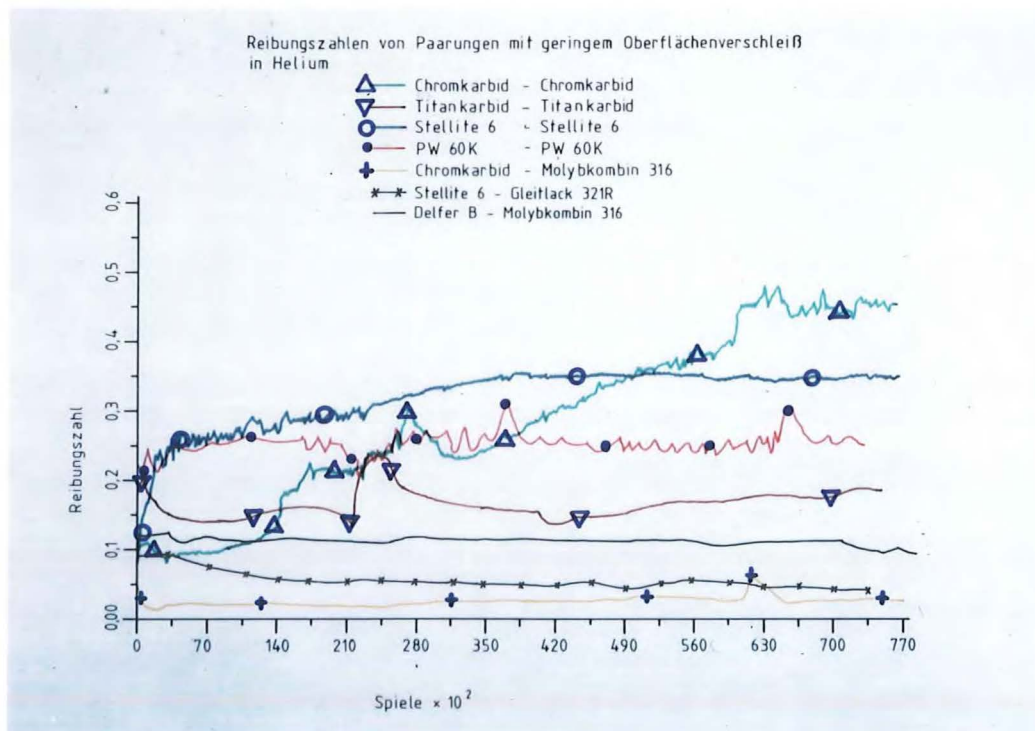


Bild 17: Reibungszahlen von Werkstoffpaarungen mit geringem Oberflächenverschleiß in Helium-Atmosphäre

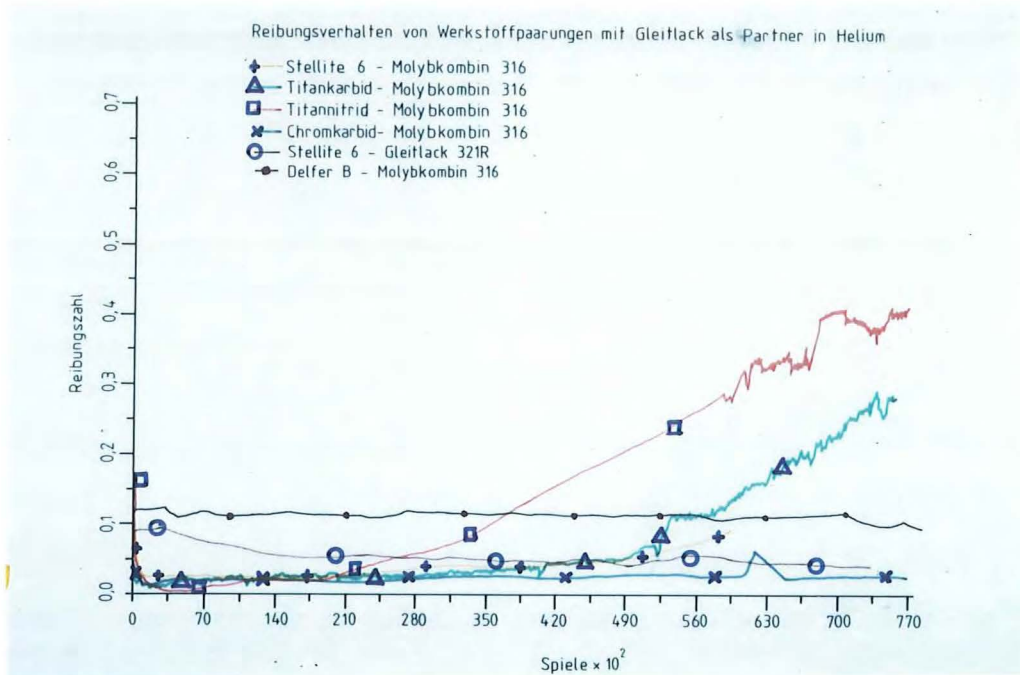


Bild 18: Reibungsverhalten von Werkstoffpaarungen mit Gleitlack als Partner in Helium-Atmosphäre

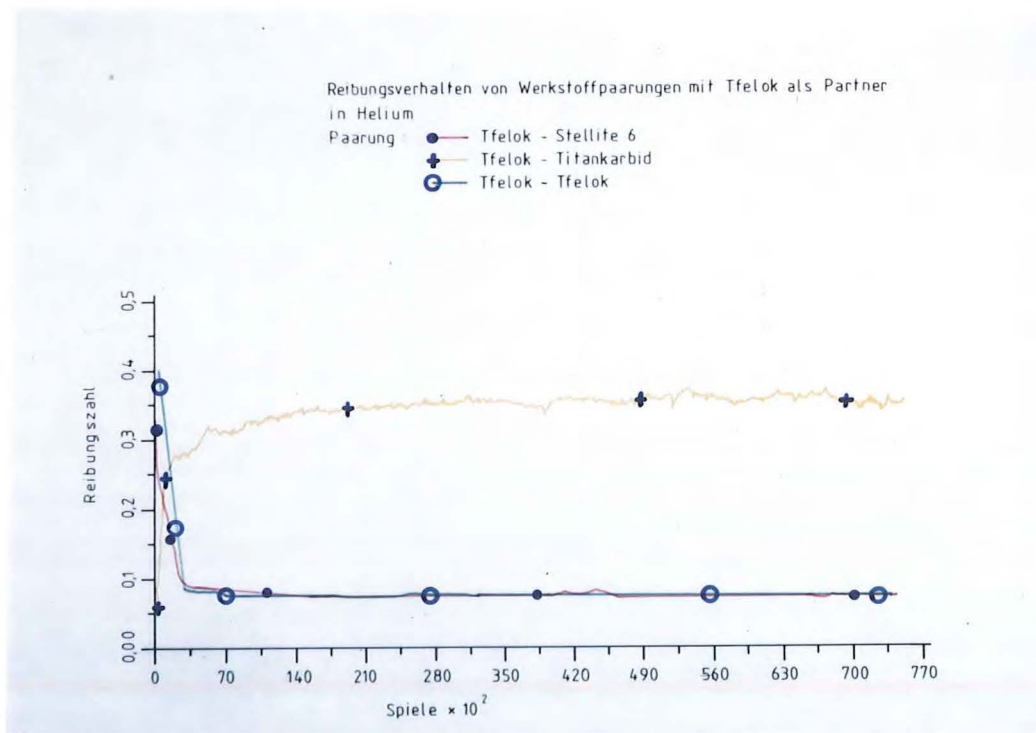


Bild 19: Reibungsverhalten von Werkstoffpaarungen mit Tfelok als Partner in Helium-Atmosphäre

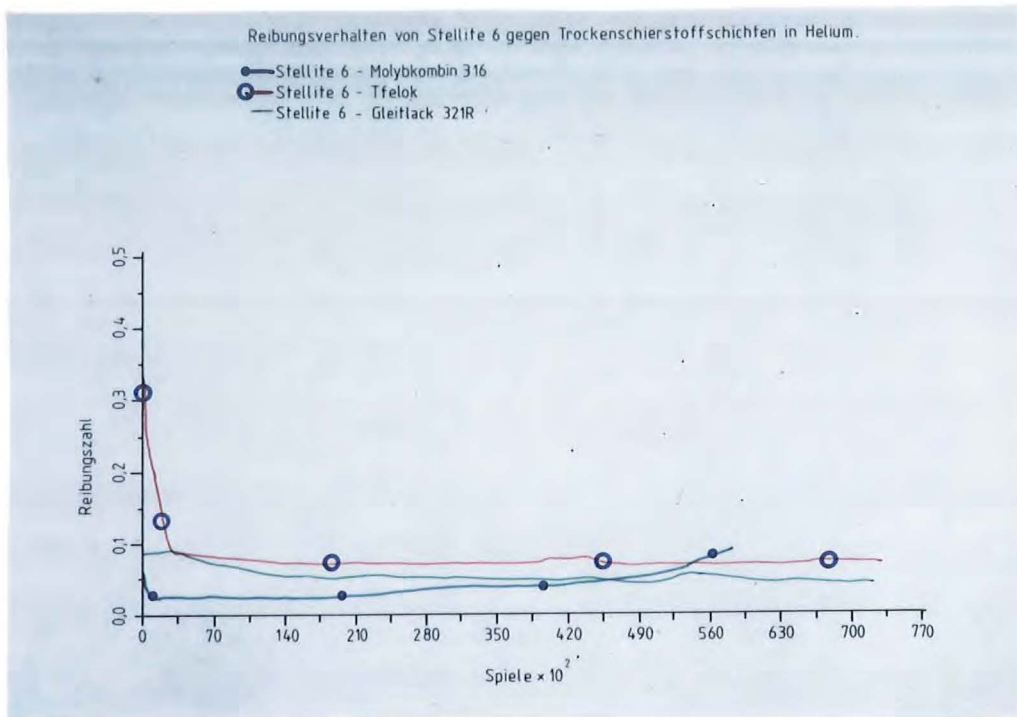


Bild 20: Reibungsverhalten von Stellite 6 gegen Trockenschmierstoffschichten

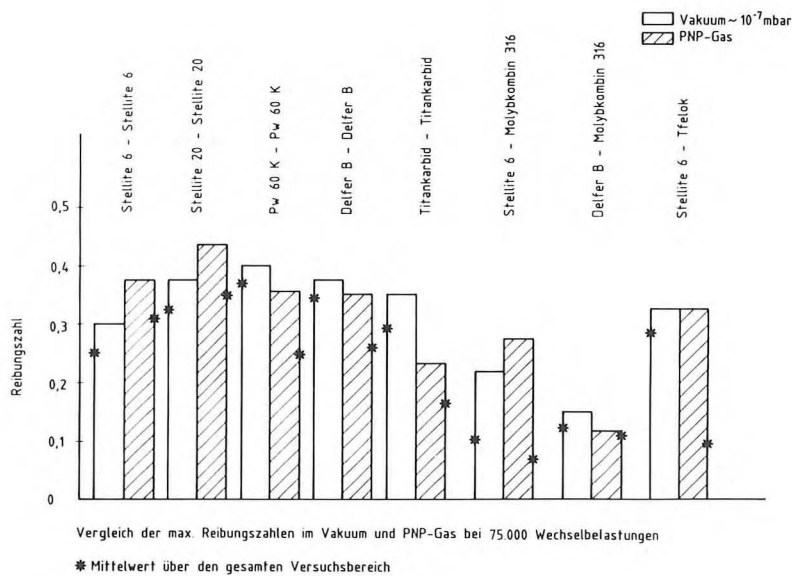


Bild 21: Reibungszahlen im Vakuum und in Helium-Atmosphäre nach 75000 Wechselbelastungen

\* Mittelwert



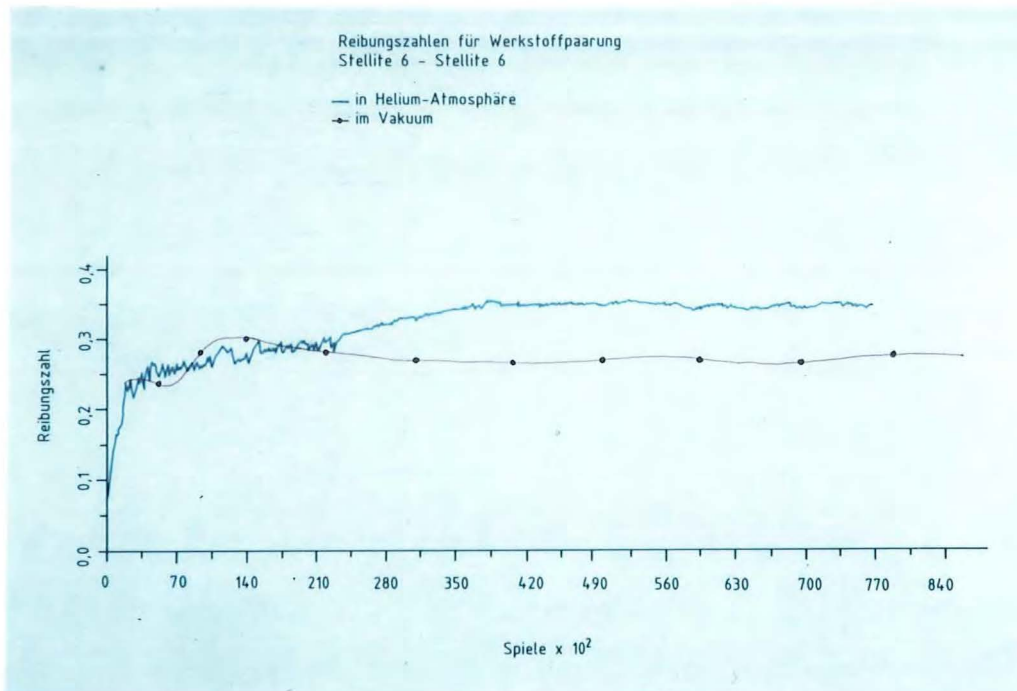


Bild 22: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen Stellite 6/Stellite 6 im Vakuum und in Helium-Atmosphäre

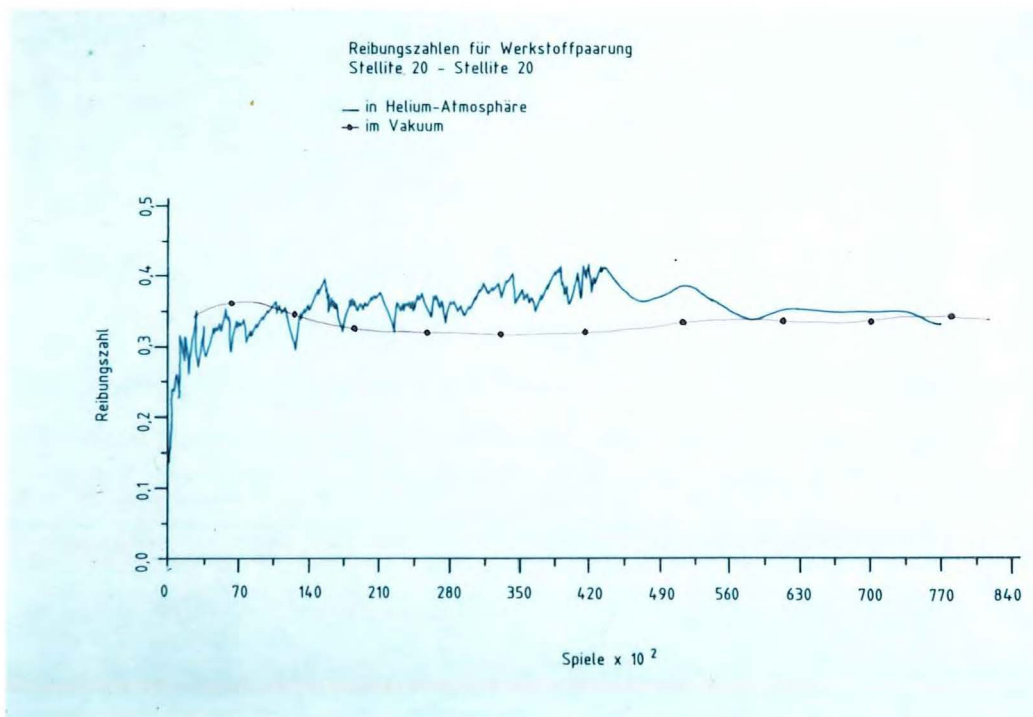


Bild 23: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen Stellite 20/Stellite 20 im Vakuum und in Helium-Atmosphäre

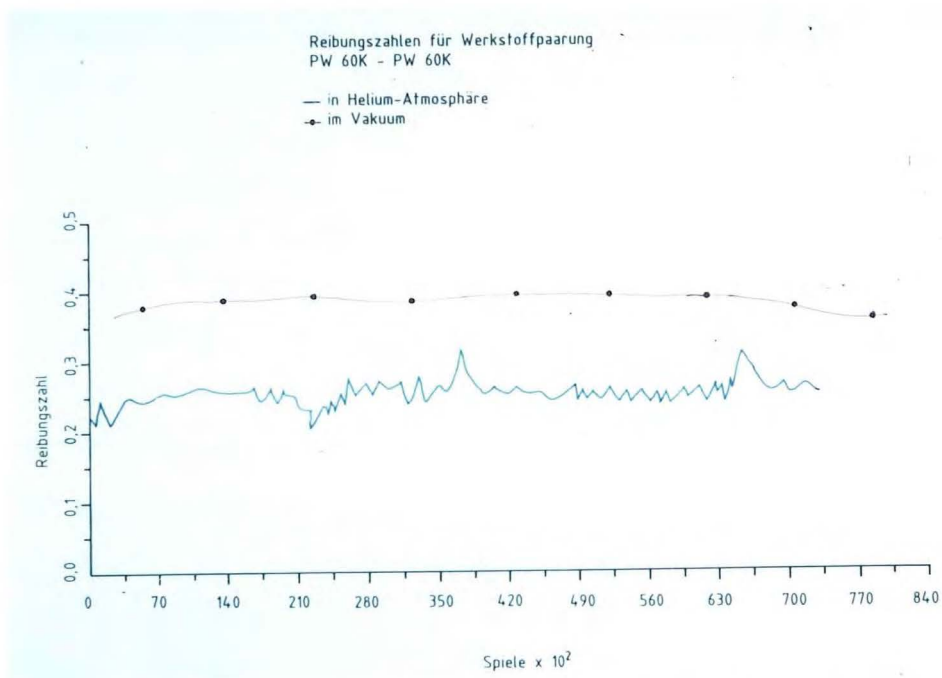


Bild 24: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen  
PW60K-PW60K im Vakuum und in Helium-Atmosphäre

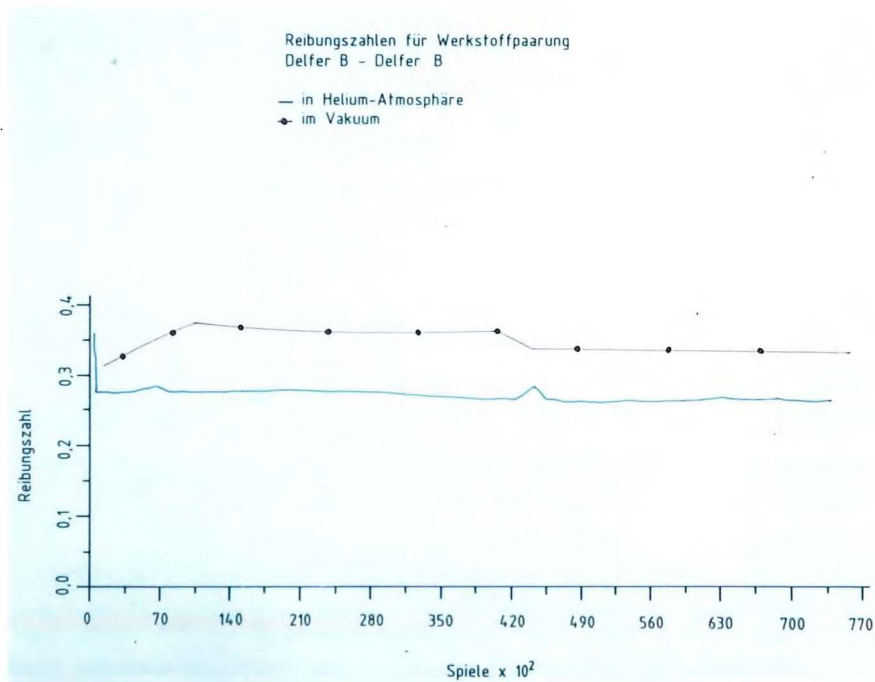


Bild 25: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen  
Delfer B/Delfer B im Vakuum und in Helium-  
Atmosphäre

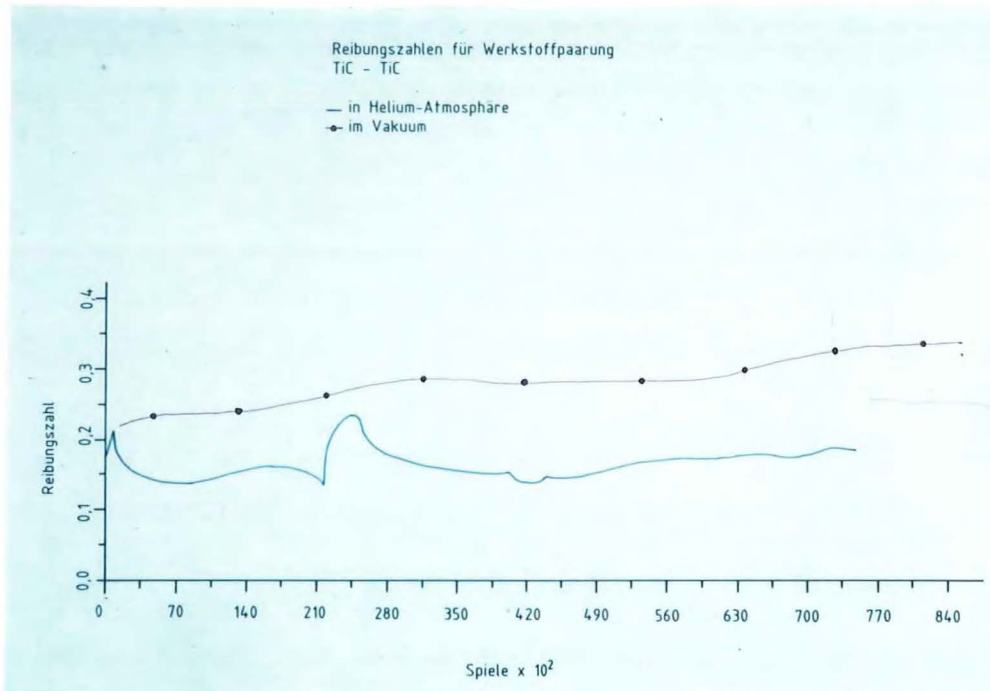


Bild 26: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen  
TiC/TiC im Vakuum und in Helium-Atmosphäre

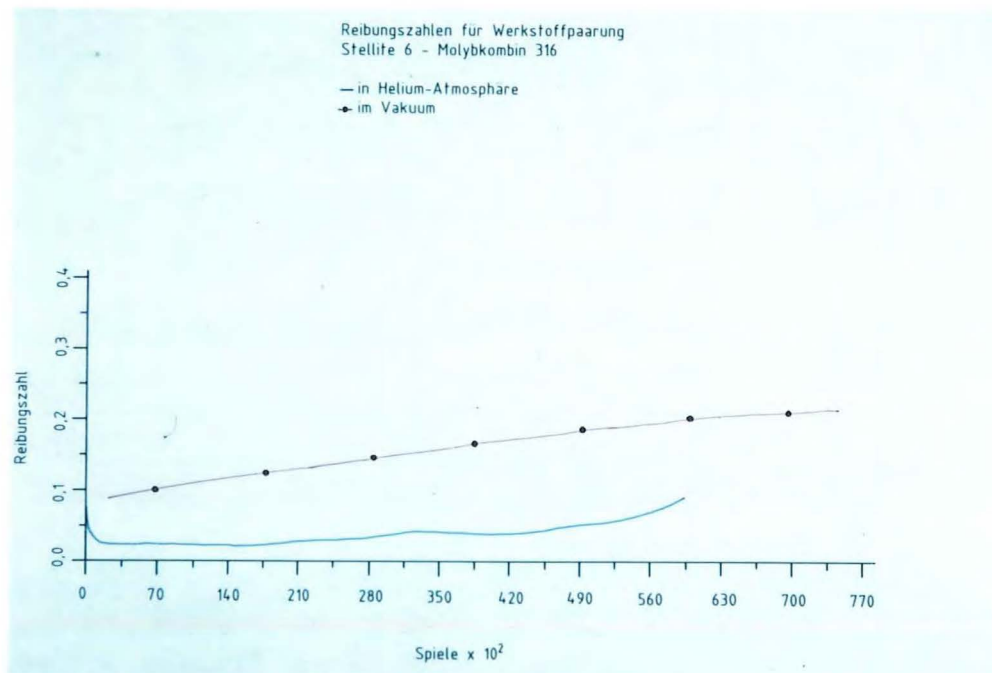


Bild 27: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen  
Stellite 6/Molybkombin 316 im Vakuum und  
in Helium-Atmosphäre

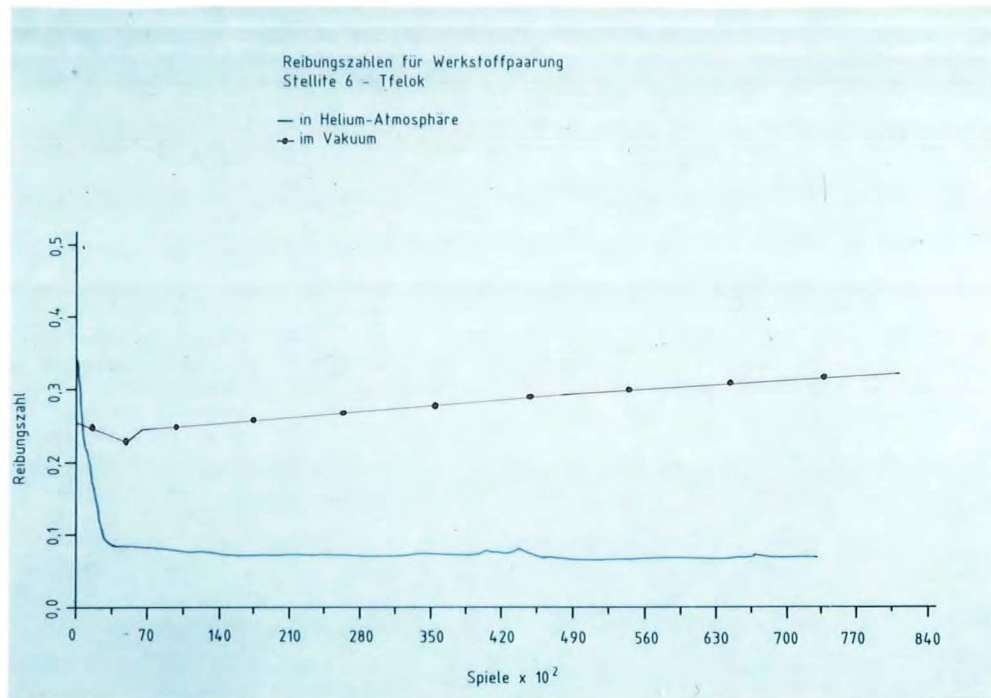


Bild 28: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen  
Stellite 6/Tfelok im Vakuum und in Helium-  
Atmosphäre

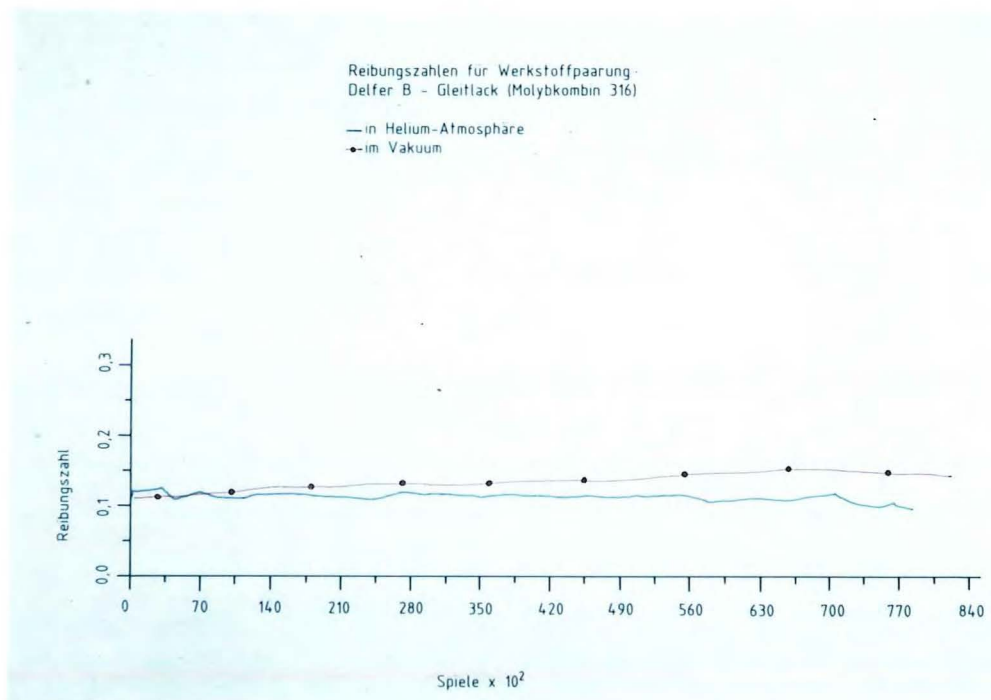


Bild 29: Reibungsverhalten der Werkstoffpaarungen  
Delfer B/Molybkombin 316 im Vakuum und in  
Helilum-Atmosphäre



## Reibungsverhalten bei verändertem Feuchtegehalt

Einfluß der Feuchte auf das Reibungsverhalten in Helium-Atmosphäre  
Stellite 6 - Molybkombin 316

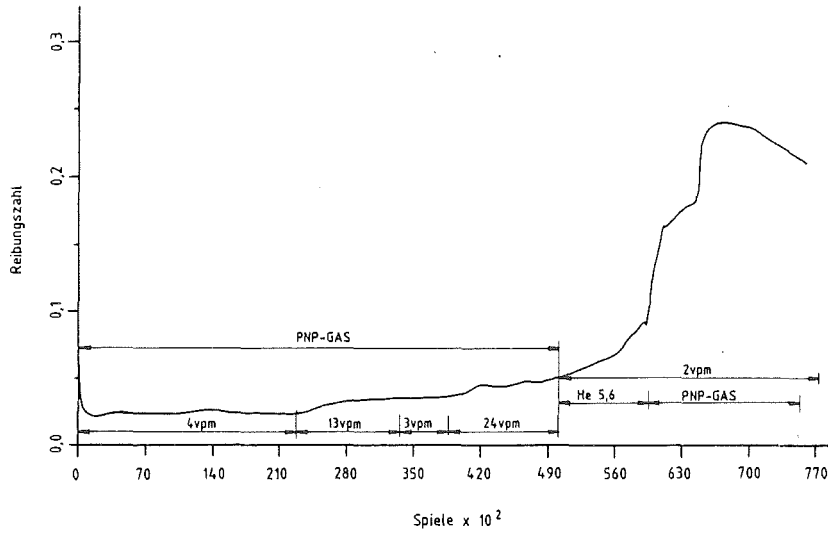


Bild 30

Einfluß der Feuchte auf das Reibungsverhalten in Helium-  
Paarung: TiC - TiC

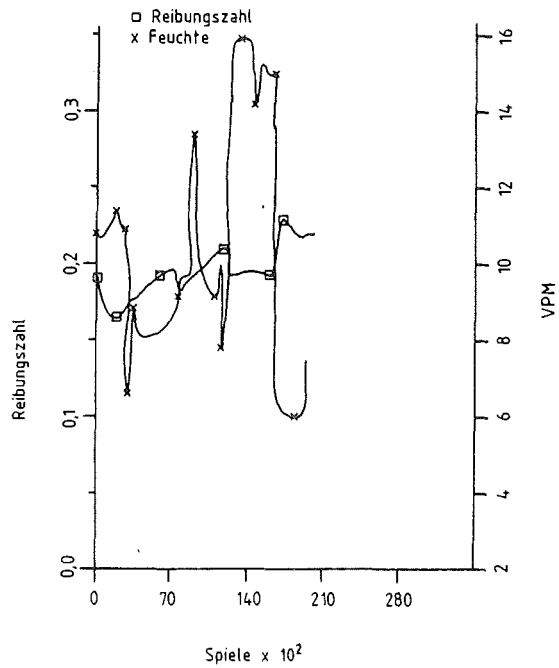


Bild 31



## 7. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Verschleiß und Reibung können durch Schmierung oder durch eine geeignete Werkstoffpaarung gemindert werden. Während eine Einschränkung des Verschleißes eigentlich immer erstrebenswert sein sollte, ist eine niedrige Reibung häufig nicht erwünscht oder zulässig. Man denke z.B. an reibschlüssige Verbindungen, die keineswegs geschmiert sein dürfen. Es muß dann meistens ein bestimmter Verschleiß zugelassen werden, der durch geeignete konstruktive und werkstofftechnische Maßnahmen in Grenzen gehalten werden kann. Anhaltspunkte zu den Einsatzmöglichkeiten von Werkstoffkombinationen (Auftragslegierungen gegeneinander, keramische Hartstoffüberzüge gegeneinander, Paarungen, bei denen ein Reibpartner mit Festschmierstoff beschichtet ist) in Helium und im Vakuum lassen sich aus den aufgeführten Versuchen ableiten:

### - Gleitreibungsverhalten von Auftragslegierungen in Helium -----

Von den Auftragslegierungen zeigen Stellite 6 und PW60K das beste kombinierte Reib- und Verschleißverhalten (Bild 14 und 17). Die Ni-Basis Legierung der TH-Aachen, die Fe-Basis Legierung Delfer B und die Co-Basis Legierung Tribaloy 800 weisen einen kleineren oder etwa gleichen Reibkoeffizienten auf, neigen jedoch zu weit höherem Verschleiß (Bild 14 und 16).

Den mit Abstand größten Reibwert und einen hohen Oberflächenverschleiß zeigt die Ni-Basis Legierung Tribaloy 700 (Bild 14 und 16).

### - Gleitreibungsverhalten von CVD-Schichten in Helium -----

Die besten Ergebnisse sind mit Titankarbid erzielt worden (Bild 15 und 17). Bei Chromkarbid ist ein stetiger Anstieg des

Reibwertes zu erkennen; die Oberfläche weist nur geringen Verschleiß auf. Die reib- und verschleißmindernden Eigenschaften dieser dünnen Keramiksichten sind nur bei unbeschädigter Oberfläche vorhanden. Schon geringe Fehlstellen führen zur großflächigen Zerstörung der Auftragsschicht.

- Gleitreibungsverhalten der Kombinationen Auftragslegierungen und Keramik gegen einen Partner mit Gleitlackbeschichtung

-----

Mit den anorganischen Gleitlacken Molybkombin 316 und 321 R sind die kleinsten Reibwerte der gesamten Versuchsreihe erreicht worden (Bild 18). Bis auf die Paarungen Nr. 14 und 15 zeigen die Reibkurven einen gleichmäßigen Verlauf mit mittleren Reibwerten  $\mu < 0,1$ , teilweise  $\mu < 0,05$ . Die Gleitlack-schichten sind mehr oder weniger abgerieben oder auf den Reibpartner übertragen worden. Die Reibpaarungen zeigen, daß der verbleibende dünne Trockenschmierfilm ausreicht, einen Verschleiß der Reibpartner (Grundwerkstoff der gleitlackbeschichteten Keile aus St37-2) weitgehend zu verhindern. Der starke Anstieg der Reibwerte von Titannitrid und Titankarbid gegen Molybkombin 316 ist auf die Zerstörung der Keramiksichten zurückzuführen.

- Gleitreibungsverhalten von Kombinationen, bei denen ein Partner Tfelok-beschichtet ist

-----

Die beiden Werkstoffpaarungen Tfelok gegen Stellite 6 und Tfelok gegen Tfelok zeigen nach der Einfahrphase einen gleichmäßigen Reibverlauf mit  $\mu < 0,1$  (Bild 19). Die Oberflächen der Kombination Tfelok gegen Titankarbid weisen einen starken Verschleiß auf. Zum einen ist hier die TiC-Schicht zertört worden und zum anderen liegt eine unzureichende Einlagerung von PTFE in der Tfelok-Schicht vor. Der Reibwert liegt folglich um Faktor 3 bis 4 über den beiden anderen Paarungen.

- Vergleich des Gleitreibungsverhaltens in Helium (HTR-Atmosphäre) und im Vakuum

-----  
Die Co-Basis Legierungen Stellite 6 und Stellite 20 zeigen im Vakuum eine geringere Reibung als in HTR-Atmosphäre (Bild 22 und 23). Zu vergleichbaren Versuchsergebnissen (Vakuum/Luft) kommen J. Spengler, F. Wunsch /3/.

Bei den übrigen zwei Auftragslegierungen - Ni-Basis Legierung PW60K und Fe-Basis Legierung Delfer B - liegt der Reibwert im Vakuum um 0,1 bis 0,15 höher als in HTR-Atmosphäre.

Die Kombinationen TiC/TiC und Stellite 6/Molybkombin 316 zeigen im Vakuum und in HTR-Atmosphäre einen ähnlichen Reibungsverlauf. Die Reibwerte liegen jedoch im Vakuum um Faktor 2 höher (Bild 26 und 27).

Die höheren Restverunreinigungen im HTR-Gas gegenüber dem Vakuum wirken sich besonders bei der Kombination Stellite 6/Tfelok aus. Der Reibwert im Vakuum  $\mu \sim 0,3$  liegt erheblich höher als in HTR-Atmosphäre  $\mu < 0,1$  (Bild 28 und 29).

- Einfluß der Feuchte

-----  
Der Einfluß des Feuchtegehaltes auf das Reibverhalten für die Kombination TiC/TiC und Stellite 6 im Kontakt mit Molybkombin 316 geht aus den Bildern 30 und 31 hervor. Bei Stellite 6/Molybkomin 316 findet ein starker Anstieg der Reibungszahl bei abnehmender Feuchte statt. Bei TiC ist der Einfluß der Feuchte dagegen nicht so stark ausgeprägt. Auch hier ist zu erkennen, daß bei steigenden Feuchtwerten ein Abfall der Reibwerte auftritt. Die beiden Versuche bestätigen, daß die Oberflächenrandzone mit Adsorptionsschicht einen starken Einfluß auf die Reibungsvorgänge hat.

8. Schrifttum

/1/ K.H. Habig

Verschleiß und Härte von Werkstoffen

Carl Hauser Verlag, München 1980

/2/ F. Wunsch

Schmierung von Satelliten und Raumfahrtssystemen

Vortrag, gehalten auf der Technischen Arbeitstagung des MZV  
am 28.03.1969 in Stuttgart-Hohenheim

/3/ G. Spengler, F. Wunsch

Schmierung unter Weltraumbedingungen

Mitteilung 65-07, Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und  
Raumfahrt, August 1965

/4/ G. Spengler, W. Hellwig, F. Wunsch

Untersuchungen über das Reibverhalten von Festschmierstoffen  
in der Atmosphäre und im Hochvakuum

Forschungsbericht 68-18, Deutsche Luft- und Raumfahrt, März  
1968

/5/ H. Loebnitz

Auswahl und Einsatzmöglichkeiten von Trockenschmierstoffen

Mineralöltechnik 12 (1967), Heft 11, S. 1-13

/6/ D.H. Buckley, M. Swikert, R.L. Johnson

Friktion, wear and evaporation rates of various materials in  
vakuum to  $10^{-7}$  Hg

ASLE - Trans 5 (1962) Nr. 1, 8-23

/7/ Z.J. Atlee, J.T. Wilson, J.C. Filmer

Lubrication in vacuum by vaporized thin metallic films

Jour. Appl. Phys. 11 (1940) Nr. 9, 611-615

- /8/ F.J. Clauss  
Lubricants and self-lubricating materials of spacecraft-mechanisms  
Lockhad Missiles and Space Division, Techn. Report 894812  
Sunnyvale, Calif. (1961).
- /9/ G. Spengler, F. Wunsch  
Über das Schmierverhalten von Doppelschichten aus Molybdän-disulfid und Polytetrafluoräthylen im Hochvakuum  
Forschungsbericht 69-21, Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, April 1969
- /10/ H. Haas  
Lebensdauerversuche an Kugellagern bei 120°C in Helium-Atmosphäre  
Kernforschungsanlage Jülich  
JÜL-1911, April 1984
- /11/ W. Hellwig, G. Spengler  
Entwicklung einiger Schichtkombinationen für Trockenschmierung von Gleitlagern beim Lauf an der Atmosphäre und/oder im UHV bei Belastungen bis 80 kp/cm<sup>2</sup> und 200 upm  
Forschungsbericht 72-69, Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt
- /12/ G. Erhard  
Zum Gleitreibungsverhalten von Raarungen von Polymerwerkstoffen gegen Stahl und gegen Polymerwerkstoffe  
VDI-Bericht Nr. 600.3, 1987
- /13/ E. Dörre  
Aufbau und Verschleißverhalten keramischer Werkstoffe  
VDI-Bericht Nr. 600.3, 1987

- /14/ K. Dreyer, J. Kolaska, H. Grewe  
Metallgebundene Hartstoffe als verschleißbeständige Werkstoffe  
VDI-Bericht Nr. 600.3, 1987
- /15/ H. Berns  
Fertigung und Verschleiß metallischer Werkstoffe  
VDI-Bericht Nr. 600.3, 1987
- /16/ F.J. Clauss  
Lubrication and space/vacuum conditions  
Scient. Lubrication 15 (1963) Nr. 3, 180-202
- /17/ M.J. Hordon  
Adhesion and cohesion of metals in high vacuum  
ASTM-STP 431, Amer. Soc. Testing Mats. S. 109-127 (1967)
- /18/ G. Heinicke  
Physikalisch-chemische Untersuchungen tribochemischer Vorgänge. Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften in Berlin.  
Berlin: Akademie Verlag (1966)
- /19/ H. Uetz  
Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Gleitverschleiß metallischer Werkstoffe  
Werkstoffe und Korrosion 19, S. 665-676 (1968)
- /20/ S. Hansen, H. Jones, A. Stephenson  
High vacuum friction  
Litton Industries of California, Report to USAF Office of Scient. Research, Beverly Hills, Calif. (1959) AFOSR Rept. TR-59-97



- /21/ H. Wiegand, G. Heinke  
Modellverschleißuntersuchungen an metallischen Werkstoff-  
paarungen im Vakuum bis zu Drücken von  $10^{-9}$  Torr  
Metalloberfläche 23 (1969)
- /22/ J.J. Frewing, W. Groß  
Strahlenresistente Schmierstoffe  
Techn. Mitteilungen, H. 2, 53. Jg., Febr. (1960), S. 76-80
- /23/ Unterlagen der Fa. Deloro Stellite GmbH, 5400 Koblenz
- /24/ Techn. Information G1 12  
Gleitlack Molybkombin 316  
Fa. Klüber, München
- /25/ Techn. Information, Spezial-Schmierstoffe,  
Fa. Dow Corning, München
- /26/ CVD-Hartstoffüberzüge  
Druckschrift 756002  
Fa. Bernex, 4018 Langenfeld
- /27/ Michael Eikmeier  
Expansion im Mikrobereich  
Sonderdruck aus "Maschinenmarkt/MM-Industriejournal",  
Vogel-Verlag, 77. Jahrgang, Heft 12 vom 9.2.1971
- Technische Information  
Fa. Schreiber, 4 Düsseldorf

